

L'UTILISATION DE LA BIOMASSE FORESTIÈRE COMME SOURCE D'ÉNERGIE AU QUÉBEC : PERSPECTIVES DE  
RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE ET DE DÉVELOPPEMENT DURABLE

Par  
William Parenteau

Essai présenté au  
Centre universitaire de formation en environnement et développement durable  
en vue de l'obtention du grade de maîtrise en environnement (M. Env.)

Sous la direction de Pierre Etcheverry

MAÎTRISE EN ENVIRONNEMENT  
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Septembre 2020

## SOMMAIRE

Mots clés : biomasse forestière, gaz à effet de serre, énergie renouvelable, carbone, développement durable, grille d'analyse, carboneutralité, changements climatiques, production de chaleur, Québec.

Au Québec, le secteur de l'énergie (production, transport et consommation) est encore fortement dépendant des énergies fossiles. En effet, ce n'est pas moins de 56 % de l'énergie consommée qui provient des hydrocarbures. D'ailleurs, des 79 mégatonnes d'équivalent CO<sub>2</sub> de gaz à effet de serre émises en 2017, 71 % étaient attribuables à ce secteur. Ainsi, le Québec doit réduire ses émissions de gaz à effet de serre et mettre l'accent sur les énergies renouvelables, surtout dans le contexte climatique actuel. À ce propos, le développement de la bioénergie est considéré comme une avenue attrayante. L'intérêt envers la production d'énergie à partir de la biomasse forestière est grandissant au Québec. Il convient donc de s'interroger sur le rôle que peut occuper cette ressource dans la mitigation des changements climatiques ainsi que sur la durabilité d'une telle pratique.

L'objectif principal de cet essai était d'analyser l'utilisation de la biomasse forestière comme source d'énergie, plus spécifiquement pour la production de chaleur, afin d'évaluer son intérêt dans une perspective de réduction des émissions de gaz à effet de serre et de développement durable au Québec. Les résultats de cette analyse ont permis de démontrer que la biomasse forestière peut contribuer significativement à la décarbonation du secteur de l'énergie, essentiellement en raison de l'aspect renouvelable de la ressource et du fait qu'elle s'insère dans le cycle court du carbone. Cependant, l'essai atteste l'importance que l'on doit attribuer à l'ampleur et à la temporalité de la dette de carbone engendrée, et ce, pour obtenir des bénéfices environnementaux intéressants à court terme. L'analyse explicite des enjeux du développement durable et l'application de la grille d'analyse, conçue par la Chaire en éco-conseil de l'Université du Québec à Chicoutimi, ont permis de déterminer que la filière peut s'inscrire dans une démarche de développement durable. Une attention plus particulière doit être apportée notamment aux enjeux de la sphère environnementale étant donné sa plus grande fragilité en matière de durabilité.

Dans l'optique de maximiser les bénéfices environnementaux et de favoriser le développement durable de la filière, 12 recommandations sont proposées dans cette production de fin d'études. Parmi celles-ci, soulignons la minimisation de la dette de carbone, la réalisation d'une cartographie fine des zones sensibles à la qualité de l'air et la mise en place d'un programme de formation pour les opérateurs de chaufferie.

## REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements vont à mon directeur d'essai, Pierre Etcheverry, pour la pertinence de ses commentaires, son ouverture, sa disponibilité et ses relectures attentives. J'aimerais également remercier Jérôme Laganière, chercheur scientifique (Centre de foresterie des Laurentides – Service canadien des forêts), qui a également supervisé cet essai. Merci d'avoir partagé ton expertise et offert de ton temps à travers nos discussions et tes relectures.

Je suis également reconnaissant envers les spécialistes qui m'ont gracieusement offert de leur temps afin de répondre à mes questions. Je remercie donc Mathieu Béland (Coordonnateur et co-porte-parole de Vision Biomasse Québec), Jean Gobeil (Président fondateur de Gobeil Dion & Associés Inc.), Jean-François Samray (Président-directeur général de l'Association québécoise de la production d'énergie renouvelable) et Jean-Pierre Bourque (Conseiller en développement industriel – biomasse et bioénergie au Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs).

Ensuite, mes remerciements s'adressent à mes amis d'ici ou d'ailleurs, vous allez vous reconnaître. Un merci particulier à mes précieux amis de Sherbrooke : Arnaud, Yona, Juan, Adriana, Fanny, Zachary, pour ne nommer que ceux-là. Avec vous j'ai partagé les plus belles années de ma vie.

J'aimerais remercier mon frère et ma sœur pour leurs encouragements. Je ne pourrais remercier assez ma mère Lynne et mon père François, sans oublier mon beau-père Jean, qui est bien plus qu'un beau-père. Je suis chanceux de vous avoir, votre support constant tout au long de ces nombreuses années d'études m'a permis d'avancer. Vous m'avez toujours encouragé peu importe mes projets et je vous en suis profondément reconnaissant.

Et finalement, un remerciement spécial à mon piano, qui lui, m'a permis de m'évader.

À ma famille, cet essai vous est dédié.

## TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION.....	1
1. LA BIOMASSE FORESTIÈRE.....	4
1.1. Qu'est-ce que la biomasse forestière? .....	4
1.2. Les autres types de biomasse .....	5
1.2.1. La biomasse agroalimentaire .....	6
1.2.2. La biomasse urbaine.....	7
1.3. Les différentes sources d'approvisionnement.....	7
1.3.1 Biomasse forestière résiduelle .....	8
1.3.2 Résidus de la transformation du bois.....	11
1.3.3 Produits forestiers postconsommation.....	13
1.3.4 Autres sources potentielles d'approvisionnement .....	16
1.4 La chaîne d'approvisionnement.....	18
1.4.1 Récolte, séchage et traitement .....	18
1.4.2 Transport, densification, entreposage, conditionnement et distribution .....	20
1.5 La valorisation énergétique .....	21
1.5.1 Combustion directe .....	23
1.5.2 Gazéification.....	24
1.5.3 Pyrolyse/liquéfaction.....	24
1.5.4 Digestion.....	25
1.5.5 Fermentation.....	25
2. L'UTILISATION DE LA BIOMASSE FORESTIÈRE ET LES GAZ À EFFET DE SERRE .....	27
2.1. L'élément chimique : carbone .....	27
2.2. Le cycle biogéochimique du carbone.....	27
2.3. Le rôle du carbone dans le réchauffement climatique.....	29
2.4. La séquestration du carbone par la forêt .....	30
2.5. L'intérêt vis-à-vis de l'utilisation de la biomasse forestière à des fins énergétiques .....	32
2.6. La carboneutralité.....	33
3. ANALYSE DU DÉBAT SCIENTIFIQUE CONCERNANT LA CARBONEUTRALITÉ DE LA BIOMASSE FORESTIÈRE.....	36
3.1. Des émissions de carbone biogénique .....	36

3.2.	L'indissociabilité des émissions de carbone de la foresterie traditionnelle et de la bioénergie .....	38
3.3.	Les lignes directrices du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat .....	38
3.4.	La remise en question de la carboneutralité .....	39
3.5.	Différentes approches méthodologiques pour différents résultats .....	41
3.5.1.	Le choix des scénarios de référence .....	42
3.5.2.	Les échelles temporelles et spatiales .....	43
3.6.	Discussion .....	44
4.	LA SITUATION ÉNERGÉTIQUE DU QUÉBEC .....	46
4.1.	Un portrait de l'énergie .....	46
4.2.	Exemples de projets énergétiques à la biomasse forestière .....	49
4.2.1.	Hôpital d'Amqui .....	50
4.2.2.	Municipalité de Causapscal .....	51
4.2.3.	Serres Bertrand .....	52
4.3.	Potentiel de réduction des émissions de GES des projets de combustion à la biomasse .....	52
5.	LES ENJEUX QUÉBÉCOIS DE L'UTILISATION DE LA BIOMASSE FORESTIÈRE .....	53
5.1.	Les enjeux environnementaux .....	55
5.1.1.	Biodiversité .....	55
5.1.2.	Qualité de l'eau .....	62
5.1.3.	Productivité du sol .....	63
5.1.4.	Productivité du peuplement .....	68
5.1.5.	Gestion des résidus .....	70
5.1.6.	Atténuation des changements climatiques .....	72
5.2.	Les enjeux sociaux .....	74
5.2.1.	Acceptabilité sociale .....	74
5.2.2.	Santé des populations et qualité de l'air .....	77
5.2.3.	Indépendance et sécurité énergétique .....	81
5.2.4.	Participation des communautés autochtones .....	82
5.3.	Les enjeux économiques .....	83
5.3.1.	Stimulation de l'économie régionale .....	83
5.3.2.	Rentabilité économique .....	84
5.3.3.	Fiabilité de l'approvisionnement .....	88

5.3.4.	Appui financier au développement de la filière .....	90
6.	ANALYSE DES ENJEUX .....	92
6.1	Présentation de l'outil .....	92
6.1.1	Pondération.....	92
6.1.2	Présentation des critères et évaluation .....	93
6.1.3	Indice de priorisation.....	95
6.1.4	Limites .....	95
6.2	Résultats.....	96
6.3	Justifications .....	98
7.	RECOMMANDATIONS.....	105
7.1.	Pour l'environnement.....	105
7.2	Pour la société.....	108
7.3	Pour l'économie .....	109
7.4	Recommandation générale.....	111
	CONCLUSION .....	112
	RÉFÉRENCES.....	114
	ANNEXE 1 : ÉVOLUTION DE LA PROVENANCE DES IMPORTATIONS EN PÉTROLE BRUT AU QUÉBEC, 1990 À 2019.....	135
	ANNEXE 2 : ÉVALUATION DU RISQUE DE DIMINUTION DES NUTRIMENTS DANS UNE FORÊT EXPLOITÉE À L'ÂGE DE LA MATURITÉ FINANCIÈRE SELON LA COMPOSITION DU PEUPLEMENT, LA DENSITÉ DU PEUPLEMENT, L'INDEX DU SITE, LE TYPE DE RÉCOLTE ET LE TYPE DE SOL.....	136
	ANNEXE 3 : ÉVALUATION DES QUANTITÉS DE CENDRES DÉRIVÉES DU BOIS GÉNÉRÉES ANNUELLEMENT – PÉRIODE 2006-2007 .....	137

## LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1.1	Classification des combustibles à base de bois .....	8
Figure 1.2	Récolte par arbres entiers (a) et récolte par troncs (b) .....	19
Figure 1.3	Aperçu des principales voies de valorisation thermochimiques et biochimiques de la biomasse .....	22
Figure 1.4	Une chaudière (a), des plaquettes (b) et des granules (c) .....	24
Figure 2.1	Le cycle du carbone simplifié.....	28
Figure 2.2	Les concentrations globales de dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> ) en partie par million (ppm) depuis les derniers 800 000 ans .....	30
Figure 2.3	Le cycle de la séquestration du carbone .....	32
Figure 2.4	Démonstration du cycle court (gauche) et du cycle long (droite) du carbone.....	33
Figure 2.5	Durée de la dette de carbone (en noir), de la période d'incertitude (en jaune) et des bénéfices de carbone (en vert) en fonction du combustible remplacé (NG : gaz naturel), du type de biomasse forestière et du mode de conversion .....	34
Figure 4.1	Consommation totale par forme d'énergie et par secteur d'activité au Québec (2017).....	47
Figure 5.1	Les sphères du développement durable.....	54
Figure 5.2	Augmentation des pertes d'éléments nutritifs (%) occasionnée par la récolte par arbres entiers pour cinq espèces d'arbre : épinette noire (BS), sapin baumier (BF), pin gris (JP), bouleau à papier (PB), peuplier faux-tremble (TA).....	64
Figure 5.3	Comparaison des coûts d'énergie pour le chauffage .....	86
Tableau 1.1	Production totale des produits conjoints du sciage de 2014 à 2018 au Québec ('000 tma).....	12
Tableau 1.2	Provenance des matières des centres de tri de résidus de CRD du Québec .....	14
Tableau 1.3	Répartition des matières acheminées au recyclage et à la valorisation (en tonnes) .....	14
Tableau 1.4	Efficacité de conversion des technologies pour la biomasse forestière et autres types de combustibles.....	23
Tableau 3.1	Facteurs d'émissions de CO <sub>2</sub> par défaut pour la combustion stationnaire dans les industries énergétiques selon différents types de combustible (kg de CO <sub>2</sub> par TJ sur une base calorifique nette) .....	40
Tableau 4.1	Potentiel de substitution énergétique pour les différentes formes d'énergie au Québec (en GWh).....	50
Tableau 5.1	Quantité totale de cendres de bois utilisée comme amendement de sol pour l'agriculture, la foresterie et la remise en état de sites au Québec.....	71

Tableau 5.2 Émissions de différents polluants en fonction du type de système et de combustible .....	79
Tableau 5.3 Effets potentiels sur la santé, de certains contaminants issus de la fumée de bois lorsque leur concentration est trop élevée dans l'air.....	80
Tableau 5.4 Coût de revient de différentes filières d'énergies renouvelables .....	85
Tableau 6.1 Système de pondération.....	93
Tableau 6.2 Présentation et description des critères d'évaluation pour chaque dimension .....	93
Tableau 6.3 Les évaluations et leur signification.....	94
Tableau 6.4 Méthode de priorisation.....	95
Tableau 6.5 Résultats d'évaluation pour chaque dimension .....	96



## LISTE DES ACRONYMES, DES SYMBOLES ET DES SIGLES

<sup>12</sup> C	Carbone 12
<sup>13</sup> C	Carbone 13
<sup>14</sup> C	Carbone 14
3RV-E	Réduction à la source, réemploi, recyclage, valorisation et élimination
ACV	Analyse de cycle de vie
AFAT	Agriculture, foresterie et autres affectations des terres
Al	Aluminium
ATP	Adénosine triphosphate
BNQ	Bureau de normalisation du Québec
Btk	Bacillus thuringiensis ssp. kurstaki
Ca	Calcium
CAAF	Contrat d'approvisionnement et d'aménagement forestier
CCNUCC	Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques
CEC	Capacité d'échange cationique
CH <sub>2</sub> O	Biomasse
CH <sub>4</sub>	Méthane
cm	Centimètre
CO	Monoxyde de carbone
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone
COV	Composés organiques volatils
CRD	Résidus de construction, de rénovation et de démolition
CTCB	Centre de transformation et de conditionnement de la biomasse forestière
DHP	Diamètre à hauteur de poitrine
EPA	Environmental Protection Agency
éq. CO <sub>2</sub>	Équivalent CO <sub>2</sub>
ETM	Éléments-traces métalliques
Fe	Fer
FQCF	Fédération québécoise des coopératives forestières
GA	Garantie d'approvisionnement
GADD	Grille d'analyse de développement durable
GES	Gaz à effet de serre

GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GJ	Gigajoule
GWh	Gigawatt-heure
H <sub>2</sub>	Dihydrogène
ha	Hectare
HAP	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Hydrogénocarbonate
hV	Hectovolt
ICI	Institutions, commerces et industries
K	Potassium
kb/j	Milliers de barils par jour
kg	Kilogramme
km	Kilomètre
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattheure
LET	Lieu d'enfouissement technique
LGN	Liquides de gaz naturel
LQE	Loi sur la qualité de l'environnement
m <sup>2</sup>	Mètre carré
m <sup>3</sup>	Mètre cube
MELCC	Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MFFP	Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
Mg	Magnésium
Mm <sup>3</sup>	Mégamètre cube
MO	Matière organique
MRC	Municipalité régionale de comté
Mt	Mégatonne
MW	Mégawatt
N	Azote
N <sub>2</sub>	Diazote
N <sub>2</sub> O	Protoxyde d'azote
NADPH	Nicotinamide adénine dinucléotide phosphate

NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ion ammonium
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Ion nitrate
NO <sub>x</sub>	Oxyde d'azote
O <sub>3</sub>	Ozone
P	Phosphore
PCI	Pouvoir calorifique inférieur
PIUP	Procédés industriels et utilisation des produits
PJ	Pétajoule
PM	Matières particulaires
ppm	Partie par million
PPR	Produits pétroliers raffinés
PRAU	Permis d'intervention pour la récolte de bois aux fins d'approvisionner une usine de transformation du bois
PRI	Période de retour sur investissement
PSPP	Une politique, une stratégie, un programme ou un projet
RAA	Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère
RADF	Règlement sur l'aménagement durable des forêts du domaine de l'État
RNCREQ	Regroupement national des conseils régionaux de l'environnement du Québec
RQA	Règlement sur la qualité de l'atmosphère
SEPM	Sapin baumier, épinettes, pin gris et mélèze laricin
Si	Silicium
SIG	Système d'information géographique
SO <sub>2</sub>	Dioxyde de soufre
TBE	Tordeuse des bourgeons de l'épinette
tep	Tonne d'équivalent pétrole
TJ	Térajoule
tm	Tonne métrique
tma	Tonne métrique anhydre
tmv	Tonne métrique verte
TWh	Térawatt-heure
UQAC	Université du Québec à Chicoutimi
µm	Micromètre

## INTRODUCTION

L'apparition de l'espèce humaine (*Homo sapiens*), il y a de cela quelques centaines de milliers d'années, n'est certainement pas un évènement banal sur Terre. Au cours de sa petite histoire sur cette planète bleue âgée de 4,54 milliards d'années, notre espèce a modifié son environnement plus radicalement que tout autre organisme vivant. Si radicalement, qu'il est désormais admis que nous sommes entrés dans une nouvelle ère géologique : l'Anthropocène. Cette ère, caractérisée par l'humain, fait de lui une véritable force géologique influençant de façon marquée autant les phénomènes atmosphériques, géologiques que climatiques. (Bonneuil et Fressoz, 2013) En effet, depuis la révolution industrielle, les activités humaines ont grandement transformé les propriétés physico-chimiques de l'atmosphère en libérant de grandes quantités de gaz à effet de serre (GES), principalement par la combustion d'énergies fossiles. Résultat : ces changements d'origine anthropique ont entraîné un forçage radiatif positif et conduit à l'augmentation de la température moyenne à la surface de la Terre. Celle-ci a grimpé de 0,74 °C entre 1906 et 2005. (Berteaux, 2014; Chistopherson et Birkeland, 2015) Fait marquant, les années 2015 à 2019 ont été les plus chaudes jamais enregistrées depuis 1880 (NOAA, 2020a). L'année 2020 serait en voie de battre tous les records de chaleur annuellement observés depuis la période préindustrielle, donc depuis plus d'un siècle (NOAA, 2020b). De plus, les concentrations de GES tels que le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O), le méthane (CH<sub>4</sub>) et le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) atteignent des sommets ayant été égalés pour la dernière fois il y a plus de 800 000 ans (IPCC, 2014). Parallèlement à cela, nous sommes témoins d'évènements comme, notamment, la fonte des glaciers, le dégel du pergélisol, la montée du niveau de la mer et la perte de biodiversité. Les changements climatiques sont donc indubitablement le plus grand défi du 21<sup>e</sup> siècle. (Berteaux, 2014; Chistopherson, 2015) Dès lors, à l'échelle globale, la réduction des émissions de GES n'est pas optionnelle, mais elle est plutôt incontournable.

À l'horizon 2030, le Québec s'est fixé une cible climatique visant une réduction de 37,5 % de ses émissions de GES, et ce, par rapport à l'année de référence de 1990 (MERN, 2018). Pour la même période, la province a comme ambition de réduire sa consommation de produits pétroliers de 40 %, de produire 25 % plus d'énergie renouvelable et de miser sur la bioénergie en haussant sa production de 50 % (MERN, 2016). Le secteur de l'énergie doit inévitablement être ciblé : il représente 71 % des émissions de GES du Québec. Il n'est donc pas surprenant d'apprendre que 56 % de la consommation d'énergie provient encore des énergies fossiles. (Whitmore et Pineau, 2020) Dans ces conditions, la décarbonation de ce secteur s'avère essentielle pour que le Québec rencontre ces cibles. À cet effet, le déploiement de la bioénergie à partir de la biomasse forestière suscite beaucoup d'intérêt au Québec. La valorisation énergétique de cette

ressource par le biais de technologies modernes (ex. chaudière à la biomasse) y est récente et est attrayante dans une optique de substitution des énergies fossiles non renouvelables, épuisables et nettement émettrices de GES.

Ainsi, comme la biomasse forestière est appelée à être davantage sollicitée à des fins énergétiques, il est cohérent d'analyser son utilité dans la lutte contre les changements climatiques, tout en prenant soin également de vérifier sa performance en matière de durabilité. Ainsi, l'objectif principal de cet essai est d'analyser l'utilisation de la biomasse forestière comme source d'énergie, afin d'évaluer son intérêt dans une perspective de réduction des émissions de GES et de développement durable au Québec. Bien que la grande majorité des éléments abordés dans le présent ouvrage soient applicables à l'ensemble des voies de valorisation thermochimiques et biochimiques, l'analyse focalisera surtout sur la production de chaleur par combustion directe. Cette décision est motivée par deux éléments, soit la plus haute efficacité de conversion des technologies pour la production de chaleur par rapport à celle de la production d'électricité ou de biocarburant et le fait que la filière est déjà bien implantée au Québec, malgré qu'elle soit encore à un stade embryonnaire. Pour répondre à cet objectif principal, cinq objectifs spécifiques ont été établis. Le premier est de réaliser un état de la situation de la filière de la biomasse forestière au Québec. Le deuxième est d'examiner dans quelle mesure l'utilisation de la biomasse forestière peut engendrer une réduction des émissions de GES. Le troisième est d'analyser et comprendre le débat sur l'aspect carboneutre de la ressource. Le quatrième est d'analyser les enjeux environnementaux, sociaux, puis économiques et appliquer une grille d'analyse de développement durable. Le cinquième est de proposer des recommandations visant à améliorer la durabilité de la filière et à optimiser les gains environnementaux.

Les informations retenues ont été sélectionnées en fonction de plusieurs critères afin d'assurer leur crédibilité. En effet, elles ont été filtrées afin de choisir celles se démarquant par leur pertinence, leur exactitude, leur actualité et leur fiabilité. De plus ont été privilégiées les sources telles que les articles scientifiques, les documents gouvernementaux, les livres de référence et les rapports scientifiques. Les informations primaires employées dans cet essai ont été recueillies auprès de spécialistes reconnus dans leur domaine d'activités pour leur expertise et leur implication.

Cette production de fin d'études est articulée en 7 chapitres. Le premier chapitre pose les bases et décrit les différents types de biomasse (forestière, agroalimentaire et urbaine), puis élabore ensuite sur les différentes sources possibles de biomasse forestière au Québec. On y retrouve également une description de la chaîne d'approvisionnement dans le but de comprendre chacune des étapes entre la récolte de la

matière en forêt et la valorisation énergétique chez le client. Enfin, est expliquée sommairement chacune des voies de valorisation énergétique disponibles. Le deuxième chapitre porte sur la compréhension de l'élément chimique carbone et de son comportement sur Terre. Ainsi, son cycle biogéochimique tout comme le rôle qu'il occupe dans le réchauffement du climat sont expliqués. À la suite de cela, le chapitre élabore sur la capacité de la forêt à séquestrer du carbone et enchaîne ensuite avec des explications sur l'intérêt de développer la filière de la biomasse forestière. Pour finir, la notion de la carboneutralité est explicitée afin d'ouvrir la porte au chapitre suivant. Le troisième chapitre entre dans le débat sur la carboneutralité de la biomasse forestière afin d'en comprendre les différents éléments. Dans le quatrième chapitre est présenté un état de la situation de l'énergie au Québec. Ceci a notamment pour but de souligner l'importance encore trop grande des sources fossiles dans le secteur de l'énergie. Aussi, ce chapitre donne en exemples trois projets concrets de conversion énergétique. Le cinquième chapitre renferme une analyse approfondie des enjeux environnementaux, sociaux et économiques en lien avec l'utilisation de la biomasse forestière pour la production de chaleur. Dans le sixième chapitre est réalisée une analyse de durabilité à l'aide d'un outil conçu à cet effet. Le dernier chapitre, le septième, fait des recommandations afin d'améliorer la performance de la filière en matière de développement durable et de réduction des émissions de GES.

## 1. LA BIOMASSE FORESTIÈRE

Le terme biomasse est employé au sens large dans le domaine de la biologie pour désigner l' « ensemble des matières organiques, d'origine animale ou végétale, présentes dans un milieu terrestre ou aquatique donné, qui est quantifiable » (OQLF, 2016). Autrement dit, c'est la masse du vivant (Thiffault, Samuel et Serra, 2015). Une déclinaison plus spécifique du terme peut alors être attribuée en fonction de la provenance de ces matières organiques. À cet égard, on peut regrouper ces différentes déclinaisons en trois grandes familles, soit la biomasse forestière, agroalimentaire et urbaine, représentant en somme 19,5 millions de tonnes de matière sèche exploitable. Sur le plan énergétique cela représente un potentiel d'énergie thermique brute de 334 PJ (93 TWh) ou presque 7 998 000 de tonnes d'équivalent pétrole (tep) annuellement, toutes familles confondues. D'ailleurs, en 2014, 58 % de cette énergie était inutilisée. (Hydro-Québec, 2014) Afin de donner une échelle de grandeur de ce potentiel, en 2019 Hydro-Québec mentionnait dans son Plan d'approvisionnement 2020-2029 qu'un TWh équivalait à la consommation en électricité d'approximativement 54 000 ménages. Selon la hiérarchie des 3RV-E, il ne serait donc pas d'intérêt d'envoyer ces matières à l'élimination, comme on ne peut les qualifier de déchets ultimes.

### 1.1. Qu'est-ce que la biomasse forestière?

Le terme biomasse forestière est employé pour désigner la matière biologique provenant des arbres et qui découle de leur croissance. Toutes les plantes ligneuses peuvent produire ce type de biomasse. (Demirbas, 2005; Morency, 2011) Il va sans dire qu'elle se retrouve en premier lieu en milieu forestier. En revanche, comme le bois est à la base de nombreuses activités économiques au Québec, beaucoup de matière ligneuse est délocalisée des forêts, ce qui la rend donc disponible dans plusieurs autres lieux d'approvisionnement (voir section 1.3). D'un point de vue global, la présence de cette matière à la surface de la Terre est colossale. D'ailleurs, il s'agit de la biomasse renouvelable la plus abondante à l'échelle mondiale, avec une production annuelle de  $10^{10}$  Mt. (Harmsen, Huijgen, Bermudez et Bakker, 2010) Cette biomasse lignocellulosique est essentiellement constituée de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine. L'agencement de ces trois macromolécules fait en sorte que sa structure est caractérisée par une grande complexité et une forte résistance. (Harmsen et al., 2010; Kpogbemabou, 2011; Cheikh, 2018)

Au sein de la *Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier*, le gouvernement du Québec propose une définition de la biomasse forestière. Celle-ci se trouve à être la loi habilitante de plusieurs règlements relatifs à l'exploitation de la forêt au Québec (*Règlement sur la protection des forêts*, *Règlement sur l'exploitation durable des forêts du domaine de l'État*, etc.). Entrée en vigueur en 2013, cette loi concrétise

les ambitions du gouvernement en matière de gestion durable de la forêt québécoise. Elle répond d'ailleurs aux critères établis par le Conseil canadien des forêts en la matière, en favorisant, entre autres, l'aménagement écosystémique de même que la gestion intégrée et régionalisée des ressources et du territoire. (MFFP, s. d.a) La définition proposée est donc la suivante : « matière ligneuse non-marchande issue des activités d'aménagement forestier ou issue de plantations à courtes rotations réalisées à des fins de production d'énergie, excluant les souches et les racines » (*Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier*). En d'autres mots, la biomasse forestière désigne tous les arbres ou parties d'arbres compris dans la possibilité forestière et ayant un potentiel de valorisation pour la production d'énergie (ex. électricité et/ou chaleur), mais n'étant pas utilisés par l'industrie traditionnelle du bois (MFFP, 2009). Par exemple, les feuilles, branches, houppiers, écorces, bougons, arbres de petit diamètre et essences non commerciales ou de faible qualité présentes en forêt publique ou privée (MFFP, 2013; Lachance 2015). Ainsi, dans un contexte bioénergétique, ce sont principalement des résidus d'activités de récolte et d'aménagement forestier laissés sur le sol ou en marge des chemins forestiers, qu'on appelle plus spécifiquement la biomasse forestière résiduelle (MFFP, 2009). Mais encore, dans une vision plus large, on y inclut également les résidus de l'industrie de la transformation, les produits forestiers postconsommation (ex. résidus de construction, rénovation ou démolition (CRD)) et la matière ligneuse issue des plantations énergétiques d'essences comme le saule (*Salix spp.*) et le peuplier hybride (*Populus hybrid*) (Gagné, 2013). D'ailleurs, la biomasse forestière est en soi intéressante pour la production de bioénergie au Québec et au Canada, du fait de la prédominance de la zone boréale et tempérée dans l'hémisphère nord. Ceci fait en sorte que la ressource est présente en abondance et pas circonscrite uniquement à une petite partie du territoire. (Thiffault et al., 2015)

## **1.2. Les autres types de biomasse**

Dans le cadre de cet essai, il est question d'analyser uniquement l'utilisation de la biomasse comme source d'énergie et ses différentes perspectives de réduction des émissions de gaz à effet de serre et de développement durable, sous le regard unique de la biomasse forestière. Néanmoins, comme il existe d'autres sources de biomasse, soit la biomasse provenant du milieu de l'agriculture et celle d'origine urbaine, il est également pertinent de couvrir ces dernières afin de bien établir ce que la biomasse forestière n'est pas.



### 1.2.1. La biomasse agroalimentaire

Lorsque l'on fait référence à la matière organique générée par le secteur agricole, l'usage du terme biomasse agroalimentaire est indiqué. Cette dernière se rapporte à deux types de résidus, soit les résidus d'origine végétale et les résidus d'origine animale. Le premier, peut comprendre les résidus de cultures agricoles comme les pailles de céréales (blé, orge et triticale), les herbacées à courte rotation et à teneur élevée en hydrates de carbone tels que le panic érigé (*Panicum virgatum*) ou l'alpiste des Canaries (*Phalaris canariensis*), les cannes de tournesol, les fanes de topinambour, les tiges et les épis de maïs ainsi que les restes de fruits et légumes (Villeneuve, Palacios, Savoie et Godbout, 2012; Cruickshank, Robert et Silversides, 2014). Les résidus de meuneries constituent également une autre source d'approvisionnement. Bref, il existe une variété de matières végétales qui peuvent avoir un certain potentiel énergétique. Quant au second type de résidus, il comprend ceux d'origine animale et englobe, par exemple, le fumier de volaille et la fraction solide du lisier de porc. Il est à savoir que la valorisation énergétique de ce type de biomasse agroalimentaire est plutôt marginale. (Van Loo et Koppejan, 2008; Godbout, Palacios, Larouche, Brassard et Pelletier, 2012)

La biomasse agroalimentaire peut être intéressante en raison de son coût relativement faible, son caractère renouvelable et de sa grande disponibilité (Villeneuve et al., 2012). Cependant, il est vrai que d'autres alternatives de valorisation peuvent entrer en compétition avec celle de la production d'énergie à partir de cette ressource et conduire à une baisse des quantités disponibles. En effet, les agriculteurs utilisent leur matière organique à diverses fins, comme pour le fourrage destiné aux animaux d'élevages de leur exploitation agricole, pour enrichir le sol ou même en vue d'intentions strictement environnementales. (Yemshanov, McKenney et Hope, 2018) À ce propos, la biomasse agroalimentaire peut être employée afin de limiter l'érosion hydrique et éolienne en préservant une certaine quantité de résidus de cultures à la surface du sol. Cette pratique est également privilégiée pour diminuer les effets potentiellement négatifs, à la suite d'un retrait de matière, sur certaines caractéristiques du sol comme la quantité de matière organique, l'activité biologique, la compaction et la structure. (Gasser et al., 2010)

À l'heure actuelle, la contribution de la biomasse d'origine agricole dans la production énergétique canadienne peut être qualifiée de négligeable. Selon Yemshanov et al. (2018), l'abordabilité des prix reliés à l'utilisation des autres types de carburants renouvelables et non renouvelables serait en cause. De plus, son potentiel énergétique serait moins intéressant que celui de la biomasse forestière. (Cruickshank et al., 2014)

### **1.2.2. La biomasse urbaine**

Les milieux urbains sont eux aussi générateurs de matières organiques, dont la nature est imprégnée par la présence importante de citoyens. Dans ce contexte, la biomasse urbaine comprend toutes les matières compostables ou organiques provenant du secteur résidentiel, mais également des institutions, commerces et industries (ICI). Il peut donc s'agir de matières putrescibles de différents secteurs ou de boues des stations d'épurations des eaux usées municipales par exemple. (Hydro-Québec, 2014; Poulsen et Adelaar, 2016) De plus, celles-ci sont abondantes en milieux urbains et peu valorisées en ce moment. En effet, les résidus verts et alimentaires municipaux, les boues municipales et les autres résidus provenant du secteur ICI totalisent 3 346 000 de tonnes humides au Québec, dont 68 % étaient destinées à l'enfouissement en 2015. Cette situation traduit le faible taux de recyclage de la biomasse urbaine qui passe de seulement 3 % pour les résidus ICI à 51 % pour les boues des municipalités. (RECYC-QUÉBEC, 2018) En revanche, on peut considérer qu'il est probable que la situation s'améliore légèrement avec le bannissement des matières organiques des lieux d'enfouissement techniques (LET) à partir de 2020.

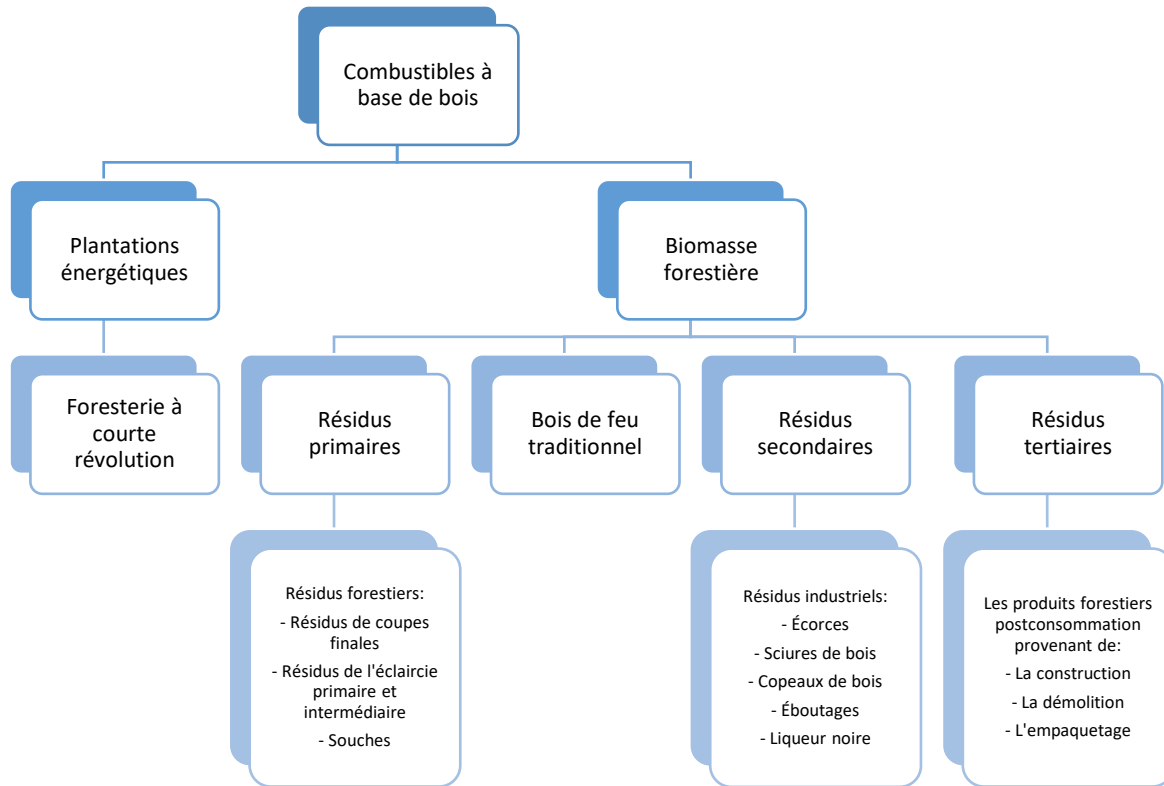
Tout compte fait, on constate que chaque famille de biomasse est bien distincte et comprend donc ses propres spécificités; une distinction est à faire entre chacune d'elles. Dans ces conditions, l'analyse et les recommandations proposées dans cet essai ne doivent ni ne peuvent être transférées aux domaines de la biomasse agroalimentaire et urbaine. Elles seront spécifiques à la biomasse forestière et à son utilisation dans un contexte comme celui du Québec.

### **1.3. Les différentes sources d'approvisionnement**

Le développement de la filière biomasse forestière au Québec doit se faire conjointement avec l'identification et l'établissement d'un approvisionnement en matière ligneuse dans différents lieux physiques. En effet, un accès stable à un volume important de matière joue un rôle fondamental dans les différents projets basés sur la biomasse en guise de source d'énergie.

La biomasse forestière valorisée sur le territoire du Québec provient d'une variété de sources d'approvisionnement (figure 1.1). Dans les faits, on en dénombre principalement trois et chacune d'elles possède ses spécificités et son propre potentiel énergétique qui se distingue à la fois par les volumes disponibles et exploitables tout comme par sa qualité. Les principales sources d'approvisionnement sont la biomasse forestière résiduelle, les résidus de transformation du bois et les produits forestiers postconsommation. (Röser, Asikainen, Raulund-Rasmussen et Stupak, 2008; Paré, Bernier, Thiffault et

Titus, 2011) De même, on considère le bois de feu traditionnel pour le chauffage, comme de la biomasse forestière. Il ne sera cependant pas considéré dans cet essai (Edward et al., 2007; Röser et al., 2008).



**Figure 1.1 Classification des combustibles à base de bois** (traduction libre de : Röser et al., 2008, p. 13)

Bien entendu, il existe d'autres sources potentielles de matière ligneuse comme les plantations énergétiques et le bois récupéré à la suite de feux de forêt ou d'épidémies d'insectes. Cependant, celles-ci sont encore plutôt marginales dans leur utilisation, nonobstant un potentiel théorique énorme, en particulier avec le bois issu des perturbations naturelles. (Morency, 2011; Mansuy et al., 2017; Mansuy et al., 2018)

### 1.3.1 Biomasse forestière résiduelle

Auparavant, la biomasse forestière résiduelle (houppiers, branches et feuillage) était laissée sur le sol à la suite des activités d'exploitation de la forêt pour la récolte du bois rond, celui destiné à la production de produits forestiers traditionnels. Désormais et depuis tout récemment, elle est maintenant vue comme

une réelle source d’approvisionnement pour la production de bioénergie. (Paré et al., 2011; Gagné, 2013; MFFP, 2013). Elle se différencie ainsi de la biomasse forestière, car cette dernière a une signification plus extensive qui ne concerne pas uniquement les résidus de coupe. Il est également important de mentionner que les souches d’arbres ne sont généralement pas incluses dans cette catégorie en raison des coûts opérationnels élevés pour l’extraction et des enjeux environnementaux auxquels leur utilisation est reliée (Yemshanov, 2014; Thiffault et al., 2015). D’ailleurs, l’un des défis qui a trait à l’exploitation de la biomasse en forêt est le coût d’approvisionnement généralement élevé (Boukherroub, LeBel et Lemieux, 2015).

La biomasse forestière résiduelle, ou résidus forestiers primaires, peut donc être générée et recueillie entre autres lorsque l’on procède à différents traitements sylvicoles comme l’éclaircie précommerciale (Conseil canadien des ministres des forêts, s. d.a). Cette opération dégage un volume de matière qui peut lui aussi être récolté et utilisé. En effet, l’éclaircie précommerciale consiste à sélectionner les arbres prometteurs et à couper les arbres compétiteurs de faible valeur marchande nuisant à leur croissance (MFFP, 2016). Une multitude d’autres interventions peuvent rendre disponible cette ressource comme la préparation du site, les coupes de récupération, les coupes finales ou même le nettoyage des emprises. (Conseil canadien des ministres des forêts, s. d.a; Thiffault et al., 2015)

### **Potentiel de la biomasse forestière résiduelle**

Actuellement, la récolte de biomasse forestière résiduelle en milieu naturel est intimement reliée aux garanties d’approvisionnement (GA) détenues par les bénéficiaires de contrats d’approvisionnement et d’aménagement pour l’exploitation du bois rond dans les forêts du domaine public (Hydro-Québec, 2014). De fait, son extraction doit se faire parallèlement aux autres activités. Les garanties d’approvisionnement permettent aux bénéficiaires de faire l’acquisition d’un volume de matière ligneuse de façon annuelle, et ce, dans le but d’approvisionner une usine de transformation à laquelle le bois sera préalablement dédié. Ce système a remplacé celui du contrat d’approvisionnement et d’aménagement forestier (CAAF) à la suite de l’entrée en vigueur du nouveau régime forestier le 1<sup>er</sup> avril 2013. (MFFP, 2017a) Ainsi, dans les forêts du domaine public, la biomasse forestière résiduelle récoltée découle nécessairement d’une garantie d’approvisionnement. De plus, comme les volumes de bois des GA sont déterminés selon la possibilité forestière, les quantités de biomasse disponibles seront limitées par celle-ci. Au Québec, c’est le forestier en chef qui réalise les calculs de la possibilité forestière. Cette dernière prend en considération la régénération et l’accroissement de la forêt afin d’assurer sa viabilité à long terme. En conséquence, elle vise à déterminer le volume de bois qu’il est possible de récolter sans toutefois nuire à la pérennité de la forêt québécoise. (CIFQ, 2017; Bureau du forestier en chef, 2020)

La possibilité forestière de la forêt publique pour les 59 unités d'aménagement en vigueur étant regroupées au sein de 15 régions administratives est de 34 148 000 m<sup>3</sup>/an, pour la période actuelle de 2018 à 2023. Par rapport à la précédente période de 2015-2018, cela représente une hausse de 1 498 100 m<sup>3</sup>/an de bois, c'est-à-dire une augmentation de 4,7 %. Les principales essences d'arbres qui seront récoltés sont le sapin baumier (*Abies balsamea*), les épinettes (*Picea spp.*), le pin gris (*Pinus banksiana*) et le mélèze laricin (*Larix laricina*) (SEPM). Ils représentent à eux seuls 67 % de la possibilité forestière. (Bureau du forestier en chef, 2019) En forêt privée, ce sont plutôt les agences régionales de mise en valeur qui ont le mandat d'établir la possibilité forestière (CIFQ, 2017). Selon les données de la Fédération des producteurs forestiers du Québec, elle était de 16 956 154 m<sup>3</sup>/an en 2018. Malgré tout, ce ne sont que 8,2 millions de mètres cubes (Mm<sup>3</sup>) de bois qui ont été acheminés vers les usines de transformation. (FPFQ, 2019) Cela représente 48 % de la possibilité forestière.

Outre la nécessité des GA pour l'exploitation du bois rond conventionnel, la biomasse forestière est pour sa part soumise à une démarche similaire dans les forêts du domaine de l'État. En effet, à compter de 2008 un programme d'attribution de la biomasse forestière a été mis en place et est administré par le ministre des Forêts, de la Faune et des Parcs. Ces attributions sont faites en fonction des estimations du forestier en chef et sont influencées en grande partie par les procédés de récolte utilisés. Par exemple, si les récoltes se font par arbres entiers ou par arbres tronçonnés; l'envergure des coupes partielles a aussi un poids dans la balance. (Bureau du forestier en chef, 2017) En ajout, les promoteurs de la biomasse forestière désirant exploiter cette ressource doivent passer par la méthode d'appel de proposition qui fonctionne selon une grille multicritère servant à déterminer les projets les plus intéressants. (MFFP, 2013) Ces attributions devront également passer par l'obtention d'un permis de récolte aux fins d'approvisionnement d'une usine de transformation de bois (PRAU). Le titulaire de ce permis obtient alors un droit forestier lui permettant de récolter de la biomasse forestière dans les différentes unités d'aménagement de la forêt publique. Dans ce cas, il obtient une autorisation effective pour 5 ans ou moins, car le ministre responsable peut décider de l'écourter afin de faciliter la planification forestière. (*Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier*; MFFP, s. d.b)

La dernière actualisation des quantités récoltables a été faite le 1<sup>er</sup> avril 2018 et a fixé à 15 623 700 tonnes métriques vertes (tmv) la biomasse forestière résiduelle disponible chaque année (Bureau du forestier en chef, 2017). Ceci constitue une approximation pour l'ensemble des 15 unités d'aménagement des forêts effectives.

En faisant abstraction du programme d'attribution et en regardant la biomasse forestière sous l'unique angle du potentiel théorique, il est possible de constater que la ressource est abondante. Ce serait 6 500 000 tma qui seraient potentiellement exploitables sur l'ensemble du territoire du Québec (FQCF, 2013). Le potentiel théorique est ainsi qualifié, car en réalité plusieurs facteurs font en sorte qu'en pratique, il n'est pas possible de tout exploiter. Ces facteurs peuvent être de l'ordre de la faisabilité opérationnelle ou économique en lien avec la récolte de la biomasse forestière résiduelle à la suite des opérations forestières. De plus, la nécessité de laisser au sol une certaine quantité de résidus pour ne pas compromettre, par exemple, la productivité des sols ou la biodiversité constitue un facteur additionnel à prendre en compte. (Edward, Smeets et Faaij, 2007) En guise d'exemple, une étude réalisée dans le nord de l'Ontario, sur trois sites différents, a permis d'estimer les quantités récupérables de biomasse forestière, et ce, en prenant en considération les enjeux opérationnels. Cette étude a démontré que seulement 25 % à 59 % de la biomasse forestière résiduelle peuvent être récupérés. À l'évidence, la perception populaire selon laquelle la biomasse forestière résiduelle peut totalement être récoltée sur les parterres de coupes n'est pas fondée, même si on ne tenait compte que des facteurs opérationnels. (Ravelic, Ryans et Cormier, 2010) Bref, en soustrayant du potentiel théorique la quantité de biomasse forestière devant être laissée sur les sites de récolte, on constate que c'est plutôt 3 860 000 tma qui seraient disponibles pour l'exploitation. Ce qui représenterait 19 300 GWh d'énergie. (FQCF, 2013)

En outre, quelques situations pourraient augmenter les quantités disponibles. D'abord, un aménagement forestier plus intensif engendrerait plus de biomasse par suite des coupes d'éclaircies ou des volumes compris dans la possibilité annuelle de coupe, mais non comblés. Dans ce dernier cas, les arbres verts non utilisés de la GA pourraient être récupérés et destinés à la production d'énergie, ce qui n'est en réalité pas souhaitable sur le plan des émissions de GES, comme nous allons le voir à la section 2.6. Ensuite, une augmentation de l'exploitation forestière conduirait nécessairement à une plus grande génération de résidus forestiers dans l'ensemble de la chaîne de valeur. (Paré et al., 2011)

### **1.3.2 Résidus de la transformation du bois**

À la suite de la récupération du bois rond en forêt, celui-ci sera dirigé vers différents procédés industriels pour sa transformation en maints produits forestiers destinés à la vente sur le marché. Il est question ici de traiter des industries du sciage et des pâtes et papiers. L'industrie de la transformation du bois consomme à elle seule la presque totalité du bois rond coupé. Ses activités généreront donc de nombreux résidus pouvant être récupérés et valorisés (CIFQ, 2017). On regroupe habituellement les résidus de la transformation du bois selon l'appellation : résidus secondaires. Ils comprennent les écorces, les sciures

et rabotures, les copeaux de bois de même que la liqueur noire de l'industrie papetière. (Edward et al., 2007; Röser et al., 2008; Cheik, 2018)

### Potentiel des résidus de la transformation du bois

Selon les données du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (2019a), en 2018 l'industrie du sciage a produit environ 8 023 000 de tonnes métriques anhydres (tma) d'écorces, de sciures et rabotures puis de copeaux de bois. Auparavant, elles étaient majoritairement utilisées comme source d'énergie au sein même des usines et comme matière pour la confection de pâte et panneaux de particules (voir tableau 1.1). Ainsi, ces résidus étaient déjà pratiquement tous utilisés par l'industrie elle-même. Cependant, dans les dernières années, plusieurs scieries ont commencé à accumuler des surplus de copeaux de bois (Mharssi, 2019).

Il est évident que la génération de résidus secondaires est intimement reliée à l'industrie de la transformation du bois. De cette manière, les volumes peuvent être affectés par le marché, comme cela a été le cas à la suite de la crise financière de 2008. Les contrecoups de cette crise ont touché l'ensemble du Québec : plusieurs usines ont cessé leurs activités et de nombreux emplois ont été perdus au cours de cette période plus difficile pour l'économie. (Röser et al., 2008; DDM, 2012; CIFQ, 2017) Ainsi, ces derniers volumes sont passés de 9,3 millions de tma en 2007 à 6,9 millions en 2009. D'un autre côté, les moments difficiles vécus par l'industrie des pâtes et papiers au cours des dernières années, notamment après la diminution de la demande pour les produits de papeterie et de la dépréciation du dollar canadien face au dollar américain, peuvent permettre de dégager davantage de volumes de résidus et de les diriger vers des projets de valorisation énergétique. (Gagné, 2013; Cheikh, 2018)

**Tableau 1.1 Production totale des produits conjoints du sciage de 2014 à 2018 au Québec ('000 tma)**  
(inspiré de : MFFP, 2019a)

		2014	2015	2016	2017	2018
Écorces <sup>3 4</sup>	Inventaire en début d'année <sup>1</sup>	38	12	39	27	31
	<b>Production totale</b>	<b>1 772</b>	<b>1 914</b>	<b>1 860</b>	<b>1 856</b>	<b>2 009</b>
	Exportation	259	316	270	232	306
	Vendues pour utilisation industrielle	276	219	183	229	141
	Vendues pour utilisation énergétique	1 232	1 338	1 400	1 365	1 548
	Vendues pour utilisation agricole	31	15	19	25	24
	Inventaire estimé en fin d'année <sup>2</sup>	12	39	27	31	20
<b>Inventaire total</b>		<b>215</b>	<b>221</b>	<b>156</b>	<b>216</b>	<b>193</b>

**Tableau 1.1 Production totale des produits conjoints du sciage de 2014 à 2018 au Québec ('000 tma)**  
(inspiré de : MFFP, 2019a) (suite)

		2014	2015	2016	2017	2018
<b>Sciures et rabotures<sup>3,4</sup></b>	Inventaire en début d'année <sup>1</sup>	11	16	22	24	36
	<b>Production totale</b>	<b>1 421</b>	<b>1 466</b>	<b>1 523</b>	<b>1 539</b>	<b>1 494</b>
	Exportation	53	56	45	33	45
	Vendues pour utilisation industrielle	1 037	1 082	1 117	1 160	1 102
	Vendues pour utilisation énergétique	231	223	254	229	256
	Vendues pour utilisation agricole	95	99	104	105	94
	Inventaire estimé en fin d'année <sup>2</sup>	16	22	24	36	34
	<b>Inventaire total</b>	<b>118</b>	<b>161</b>	<b>168</b>	<b>155</b>	<b>125</b>
<b>Copeaux<sup>3,4</sup></b>	Inventaire en début d'année <sup>1</sup>	9	10	23	34	128
	<b>Production totale</b>	<b>4 662</b>	<b>4 577</b>	<b>4 676</b>	<b>4 594</b>	<b>4 520</b>
	Exportation	235	282	286	271	333
	Vendus pour utilisation industrielle	4 360	4 259	4 307	4 188	4 253
	Vendus pour utilisation énergétique	62	20	72	41	30
	Vendus pour utilisation agricole	4	3	0	0	6
	Inventaire estimé en fin d'année <sup>2</sup>	10	23	34	128	27
	<b>Inventaire total</b>	<b>325</b>	<b>314</b>	<b>339</b>	<b>394</b>	<b>348</b>

1. Volume reporté de l'année précédente et présumé écoulé en utilisation industrielle pour l'année en cours.

2. Inventaire final des Producteurs = Inv. Initial + Prod. Totale – Exportation – Utilisations (industrielles + énergétiques + agricoles).

3. Les productions ne tiennent pas compte des produits conjoints issus de la seconde transformation.

4. Les productions ne tiennent pas compte des usines sans permis du MFFP (moins de 2 001 m<sup>3</sup>).

### 1.3.3 Produits forestiers postconsommation

Les produits forestiers postconsommation, ou résidus tertiaires, proviennent essentiellement du bois d'emballage, des biens en fin de vie (ex. meubles) et des résidus générés par le secteur de la construction, de la rénovation et de la démolition (CRD). (Edward et al., 2007; Paré et al., 2011; Cheikh, 2018) Cette source de matière ligneuse est particulièrement intéressante pour la production de bioénergie en raison de son coût faible. Cependant, le bois est souvent contaminé par toutes sortes de produits. On peut y retrouver des agents de conservation, des insecticides, du métal et des produits de plastique indésirables. (Röser et al., 2008)

#### Potentiel des produits forestiers postconsommation

Selon les données fournies par RECYC-QUÉBEC dans son Bilan de la gestion des matières résiduelles pour l'année 2015, les écocentres ont reçu approximativement 405 000 tonnes de matières résiduelles. Sur ce volume, 66 % étaient de type CRD. De plus, il existe au Québec plusieurs centres de tri de résidus de la construction, de la rénovation et de la démolition étant en opération. Ces derniers reçoivent leurs matières



d'une variété de sources d'approvisionnement, dont les écocentres, mais principalement (51 %) des entreprises de location de conteneurs et des gestionnaires de chantier (voir tableau 1.2). (RECYC-QUÉBEC, 2017)

**Tableau 1.2 Provenance des matières des centres de tri de résidus de CRD du Québec** (inspiré de : RECYC-QUÉBEC, 2017)

Source d'approvisionnement	Pourcentage <sup>1</sup>
Résidentiel et municipal (incluant écocentres)	17 %
Systèmes de collecte propre aux centres de tri	27 %
Entreprise de location de conteneurs ou gestionnaire de chantier	51 %
ICI	1 %
Autres (incluant autre centre de tri CRD)	4 %
<b>Total</b>	<b>100 %</b>

1. Ces taux sont approximatifs et proviennent d'une estimation des installations sondées

En 2015, ces différents centres de tri ont récupéré pas moins de 1 631 000 tonnes de résidus de CRD, avec une moyenne de 45 000 tonnes par établissement. En convertissant le volume total en conteneurs de 40 verges cubes, il est question de 204 000 unités. Après quoi, il faut noter que ce ne sont que 794 000 tonnes de la masse totale (1 631 000 tonnes) qui ont été acheminées au recyclage ou à la valorisation. Tout compte fait, bien que ces statistiques soient notables, celles-ci ne comprennent pas uniquement des résidus d'origine forestière, mais également des métaux, du bardeau, du verre, etc. (RECYC-QUÉBEC, 2017) Dans ces conditions, le tableau 1.3 décortique ces statistiques et permet de cibler la matière d'intérêt : le bois.

**Tableau 1.3 Répartition des matières acheminées au recyclage et à la valorisation (en tonnes)** (inspiré de : RECYC-QUÉBEC, 2017)

Matière	Recyclage	Valorisation	Autres / Non-spécifiés	Quantité acheminée au recyclage ou valorisée (tonnes)	Composition de ce qui est acheminé
Agrégats <sup>1</sup>	168 000	S.O.	5 000	<b>173 000</b>	<b>21,8 %</b>
Bois et résidus de bois	165 000	277 000	2 000	<b>444 000</b>	<b>55,9 %</b>
Bardeaux	18 000	13 000	/	<b>31 000</b>	<b>4 %</b>
Gypse	10 000	S.O.	/	<b>10 000</b>	<b>1,2 %</b>
Carton / Fibres	11 000	S.O.	/	<b>11 000</b>	<b>1,3 %</b>
Métaux	53 000	S.O.	/	<b>53 000</b>	<b>6,6 %</b>

**Tableau 1.3 Répartition des matières acheminées au recyclage et à la valorisation (en tonnes)** (inspiré de : RECYC-QUÉBEC, 2017) (suite)

Matière	Recyclage	Valorisation	Autres / Non-spécifiés	Quantité acheminée au recyclage ou valorisée (tonnes)	Composition de ce qui est acheminé
Autres (plastiques, verre)	1 000	/	/	<b>1 000</b>	<b>0,1 %</b>
Matières mélangées	37 000	15 000	5 000	<b>58 000</b>	<b>7,2 %</b>
	<b>462 000</b>	<b>306 000</b>	<b>12 000</b>	<b>779 000</b>	
	58,2 %	38,5 %	1,5 %		
Exportation hors Québec				15 000	1,9 %
<b>TOTAL</b>				<b>794 000</b>	<b>100 %</b>

1. Agrégats qui sont passés par un centre de tri. Le Bilan ne prend pas en considération les agrégats qui ont pu être conditionnés et recyclés directement en chantier (ex. les infrastructures). Cette dernière activité regroupe la majorité des volumes de cette matière.

D’abord, le précédent tableau démontre la part importante (55,9 %) du bois et des résidus de bois dans l’ensemble des 794 000 tonnes de matières CRD acheminées au recyclage et à la valorisation dans les centres de tri. Effectivement, ceux-ci correspondent à la majorité des matières acheminées avec 444 000 tonnes. Ensuite, on peut observer que 63 % de ce bois est destiné à la valorisation presque exclusivement énergétique, tandis que 37 % le sont à des fins de recyclage. (RECYC-QUÉBEC, 2017)

Le potentiel de valorisation des produits forestiers postconsommation est limité par certains facteurs. D’une part, les volumes disponibles à l’échelle du territoire québécois ne sont pas répartis de façon homogène. En effet, une région fortement peuplée générera davantage de matière qu’une région qui l’est moins; la matière sera proportionnelle à la population. De ce fait, elle sera plus abondante dans la région métropolitaine de Montréal. (Gagné, 2013) D’autre part, les produits forestiers postconsommation se classent selon trois grades, en fonction de leur degré de contamination : le grade 1 (non contaminé), le grade 2 (faiblement contaminé) et le grade 3 (fortement contaminé). Les débouchés pour ce dernier grade sont pratiquement inexistants. En plus, il représente 10 à 20 % du volume total et, corollairement, sa gestion engendrera plutôt des coûts additionnels pour les centres de tri, à travers la manutention (DDM, 2012; Gagné, 2013). À ce sujet, une des voies de valorisation, quoi que pas la plus noble, pour les particules fines fortement contaminées, est le recouvrement journalier dans les LET. Ces particules, ou poussières fines, ne représentent qu’une portion des produits forestiers postconsommation de grade 3 et sont, en réalité, un sous-produit du processus de tri du bois. (DDM, 2012) En ce qui a trait aux grades 1 et 2, ceux-ci représentent respectivement à peu près 20 % et de 60 % à 70 % des volumes générés (Gagné, 2013).

Leurs principaux débouchés sont l'industrie du panneau de particules (grade 1 et 2) et la production d'énergie (grade 1). Les produits forestiers postconsommation de grade 1 pourraient également servir à produire des granules énergétiques. (DDM, 2012) Dans le cas du bois CRD de grade 2, celui-ci pourrait aussi être utilisé pour la production d'énergie dans une chaudière, mais cette dernière doit avoir une puissance au moins supérieure à 3 MW en raison des contaminants qui s'y trouvent (FQCF, 2013).

Tout bien pesé, un portrait global de la situation des produits forestiers postconsommation peut être dressé. Néanmoins, les données présentées par RECYC-QUÉBEC (2017) doivent être nuancées par le fait qu'elles n'incluent pas l'ensemble des installations : plusieurs d'entre elles (23 %) n'ont pas répondu à l'appel pour la compilation des données récentes dans le Bilan.

#### **1.3.4 Autres sources potentielles d'approvisionnement**

Chaque année les forêts sont touchées par de multiples perturbations naturelles (OIFQ, 2009). Au Québec, les régimes de perturbations sont dominés par le feu, les épidémies d'insectes et les chablis. Ceux-ci peuvent être plus ou moins fréquents selon l'unité d'aménagement. Chaque région ayant ses propres spécificités en matière de perturbations naturelles. De plus, comme ces événements peuvent avoir différents effets sur la récolte du bois rond, le forestier en chef les prend en considération lorsqu'il établit la possibilité forestière. Cela étant dit, cette dernière peut faire l'objet de modifications au fil du temps en fonction de l'ampleur et de la sévérité réelles des perturbations. En effet, malgré les connaissances actuelles en la matière, celles-ci sont difficiles à anticiper en raison de leur caractère aléatoire et leur dynamique complexe. (Bureau du forestier en chef, 2013) Le potentiel de ce type de biomasse forestière est donc incertain (Yemshanov, 2014).

Dans l'Est du Canada, les arbres touchés par ces perturbations naturelles pourraient être utilisés comme une source de matière ligneuse à des fins de production d'énergie (Paré et al., 2011; Cheikh, 2018). Avant, les volumes disponibles étaient difficiles à estimer, mais certaines études récentes précisent davantage les quantités théoriques disponibles à l'aide de la télédétection. Les estimations nationales pour le Canada en ce qui a trait à la disponibilité de la biomasse affectée par le feu et les ravages d'insectes sont approximativement de  $47 \pm 18 \times 10^6$  tma et  $60 \pm 30 \times 10^6$  tma respectivement. (Mansuy et al., 2017; Mansuy et al., 2018) Ces quantités sont colossales si on les compare à la quantité de résidus rendue disponible par les activités de récolte qui est de  $14 \pm 2 \times 10^6$  tma (Mansuy et al., 2017).

D'ailleurs, Paré et al. (2011) soulèvent que la disponibilité locale est imprédictible et que la récolte serait difficile à cause de la difficulté d'accès aux sites en question. La fiabilité de l'approvisionnement n'est donc

pas au rendez-vous. Malgré cela, le potentiel brut en biomasse forestière par suite des perturbations naturelles est à nouveau intéressant si l'on porte un simple regard sur les superficies touchées. En ce qui a trait aux feux de forêts, sur la période 1922 à 2007, c'est en moyenne 88 651 ha qui ont été affectés par le feu de façon annuelle. (OIFQ, 2009) Même que ce chiffre est appelé à s'accroître, car selon plusieurs études récentes, le réchauffement du climat aura une incidence directe sur les régimes des feux de la forêt boréale nord-américaine. C'est à la fois l'intensité, la superficie et la fréquence de ceux-ci qui seront plus importants. (Bergeron, Cyr, Girardin et Carcaillet, 2011; Boulanger et al., 2013; Erni, 2016) Actuellement, la géographie des régions touchées nous indique que ce sont les zones centrales et nordiques de la forêt boréale québécoise qui sont la plupart du temps les plus concernées, la majeure partie des superficies brûlées étant située au-delà de la limite nordique des forêts attribuables. (OIFQ, 2009)

Avec le feu, les épidémies d'insectes dominent le portrait des régimes de perturbations. Sur l'ensemble du territoire de la province, c'est la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana*), couramment désignée sous l'acronyme TBE, qui fait le plus de dégâts. Qui plus est, la TBE est un insecte défoliateur qui peut engendrer une diminution de la croissance chez les arbres affectés, voire leur mort. À la suite d'une épidémie, la qualité et la rentabilité des arbres touchés sont diminuées, les rendant inintéressants pour l'industrie du sciage et de la pâte (Boukherroub et al., 2015). De plus, l'influence de cet insecte en milieu forestier est considérable malgré les méthodes de prévention prises par le gouvernement dans sa planification de l'aménagement forestier. À ce propos, ces méthodes peuvent consister en une lutte directe à l'aide d'un insecticide biologique nommé *Bacillus thuringiensis* var. *kurkstaki* (Btk), souvent employé conjointement à la récolte du bois des peuplements les plus vulnérables comme le sapin baumier (*Abies balsamea*) et l'épinette blanche (*Picea glauca*). (Bureau du forestier en chef, 2013; MFFP, 2019b) À l'égard des superficies touchées par la TBE, le Ministère de la Faune, des Forêts et des Parcs (2019b) avance que celles-ci s'élèvent à 9 608 488 ha pour l'année 2019, ce qui en fait non moins une source potentielle de biomasse, surtout en ayant constaté les quantités théoriquement disponibles estimées par Mansuy et al. (2018). En outre, pour ne donner que l'exemple de l'Ouest canadien, on y fait depuis plusieurs années la récolte d'arbres infestés par un autre insecte qui cause beaucoup de dommage, le dendroctone du pin ponderosa (*Dendroctonus ponderosae*). Ces arbres n'ayant aucune valeur marchande pour la production de produits forestiers traditionnels, comme le bois d'œuvre ou le papier, sont maintenant valorisés en granules pour la production d'énergie. (Boukherroub et al., 2015)

## **1.4 La chaîne d'approvisionnement**

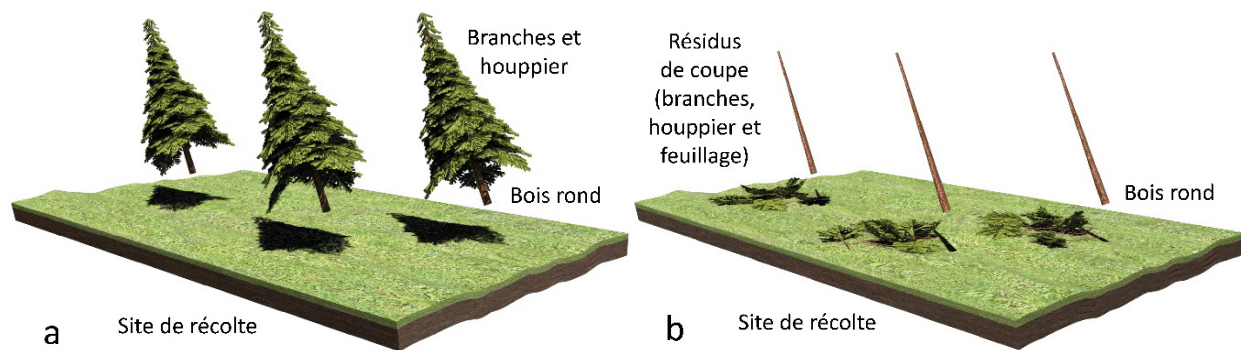
Il sera question ici d'identifier et de décrire les principales étapes de la chaîne d'approvisionnement de la biomasse forestière pour la production d'énergie. La chaîne d'approvisionnement est un élément fondamental dans le développement de cette filière énergétique (Hmaied, 2019). Cette section s'articulera donc autour de la récolte, du séchage, du traitement, du transport, de la densification, de l'entreposage, du conditionnement et de la distribution, afin de procurer une description sommaire de ces étapes. Il faut noter que le scénario présenté ici ne représente pas tous les scénarios possibles quant à la chaîne d'approvisionnement de la biomasse forestière. Plusieurs variantes peuvent être observées, notamment au niveau des étapes subséquentes au transport. L'objectif ici est de dépeindre un portrait global.

### **1.4.1 Récolte, séchage et traitement**

Les premières étapes techniques de la chaîne d'approvisionnement s'effectuent au site de récolte, avant que la biomasse forestière soit récupérée et transportée vers des installations pour sa valorisation énergétique. Ces étapes se déclinent d'abord par la récolte, ensuite par le séchage et enfin, par le traitement de la matière.

En premier lieu, en ce qui concerne l'étape de la récolte de la biomasse forestière, celle-ci, et dans la généralité des cas, est incluse dans les opérations de récolte du bois rond. Elle est donc faite parallèlement à ces précédentes activités, ce qui est en fait préférable pour des questions de rentabilité. D'ailleurs, Morency (2011) mentionne que la viabilité économique des projets énergétiques à base de biomasse est hautement reliée à la capacité de juxtaposer les activités traditionnelles de récolte du bois rond faites par les détenteurs d'une GA, avec les activités de récolte de la biomasse forestière résiduelle.

Lors de l'exploitation de la forêt au Québec en 2006, les deux méthodes de coupe les plus utilisées étaient la récolte par arbres entiers, représentant d'ailleurs 52,5 % des méthodes utilisées, et la récolte par troncs pour le reste (voir figure 1.2) (MFFP, 2006).



**Figure 1.2 Récolte par arbres entiers (a) et récolte par troncs (b)** (inspiré de : Thiffault et al., 2011, p. 279. Production à partir de V-ray, Rhino et InDesign)

Dans le premier cas, l'arbre coupé est transporté tel quel jusqu'au chemin forestier où il sera ébranché et écimé (Oumouhou, 2012). De la sorte, les résidus (branches, houppier, etc.) se retrouveront à ce moment en bordure du chemin. Au sein de cette méthode, il est possible de distinguer différentes phases : l'abattage, le débardage, l'ébranchage et la mise en andains des résidus forestiers (OIFQ, 2009). En contrepartie, dans le second cas, les résidus sont déposés sur le sol forestier, car l'arbre est ébranché, tronçonné et écimé sur le parterre de coupe (Oumouhou, 2012). La matière est ensuite placée en bordure du sentier pour être finalement débardée par le porteur forestier. Aussi, pour diminuer les coûts reliés au débardage de la biomasse forestière résiduelle, celle-ci est la plupart du temps jumelée avec celui des billes de bois. (FQCF, 2013) Il est à savoir que les résidus en marge des chemins forestiers, qui découlent de la méthode par arbres entiers, seront plus contaminés (sable, terre, roches, etc.) et, par le fait même, de moins bonne qualité que s'ils avaient été laissés en forêt. En revanche, ceux-ci seront plus facilement accessibles que les résidus laissés directement sur le parterre de coupe. (Lachance, 2015)

En ce qui concerne la récolte de la biomasse forestière provenant de l'industrie de transformation du bois (première ou deuxième transformation) ou des produits forestiers postconsommation, celle-ci est récupérée directement au lieu d'approvisionnement (usine, écocentre, etc.) (Nature Québec, 2014a).

En second lieu, le séchage a comme objectif de diminuer la proportion en eau contenue dans la biomasse forestière. Dans les pays nordiques comme le Canada, le taux d'humidité de la biomasse forestière résiduelle venant tout juste d'être récoltée se situe entre 55 % et 60 % (sur base humide) (Richardson, Björheden, Hakkila, Lowe et Smith, 2006). Le processus de séchage se fait de façon naturelle, en bordure des chemins forestiers et permet, en l'espace de quelques semaines seulement, de diminuer de 20 % à 30 % l'humidité dans la biomasse n'étant pas fragmentée. Certes, de nombreux facteurs entrent en

compte dont la saison, les précipitations, le vent et la méthode employée pour former les andains. (MFFP, 2006) Sur ce dernier point, les andains plus petits évacueront plus vite l'humidité, mais seront plus susceptibles de la regagner rapidement (Richardson et al., 2006). Afin d'éviter que les andains reprennent l'humidité en attendant leur traitement, l'utilisation de bâches adaptées est de mise (Nature Québec, 2014a). Une fois la matière séchée, son pouvoir calorifique inférieur par tonne (PCI/tm) sera augmenté et les coûts de transport par kWh seront réduits, étant donné que les camions transporteront moins d'eau et plus d'énergie. (FQCF, 2013; Nature Québec, 2014a) L'intérêt de contrôler l'humidité contenue dans la biomasse forestière ne réside pas uniquement dans les coûts de transport, mais aussi dans le fait que le taux d'humidité est un critère crucial pour la valorisation énergétique (MFFP, 2001).

En troisième lieu, l'étape du traitement est la dernière à être exécutée au site de récolte. Elle consiste essentiellement en la fragmentation (broyage ou déchiquetage), mais peut aussi comprendre la mise en fagots ou en ballots et la compaction (MFFP, 2006). Le processus de fragmentation vise à préparer et à densifier le matériel (cimes, branches et feuillage) pour diminuer les coûts de transport (FQCF, 2013). En effet, comme la biomasse forestière résiduelle a peu de valeur et que sa densité est faible, ces opérations sont essentielles (Lachance, 2013). Il est également recommandé de compacter le matériel pour hausser sa densité (Conseil canadien des ministres des forêts, s. d.a).

Au cours de la fragmentation, deux opérations seront utilisées, soit le déchiquetage grâce à une déchiqueteuse mécanique et le broyage avec un broyeur à marteaux et enclumes stationnaires. De façon générale, on utilise la première opération pour le matériel non contaminé et la deuxième pour le matériel contenant du sable, de la terre et de la roche. (MFFP, 2006) Ce n'est qu'après ces étapes de récolte, de séchage et de traitement, que la biomasse forestière pourra être placée dans les camions de transport pour poursuivre son chemin à travers la chaîne d'approvisionnement.

#### **1.4.2 Transport, densification, entreposage, conditionnement et distribution**

Après le traitement, la biomasse forestière est fin prête à être chargée dans les camions en direction du centre de conditionnement et d'entreposage (Nature Québec, 2014a). Elle peut cependant être livrée directement chez le consommateur dans certains cas (MFFP, 2006). Le transport représente 30 % à 50 % des coûts d'approvisionnement de la matière et certains facteurs, comme les distances à parcourir, le temps de transport, le poids de la biomasse ainsi que le temps de chargement et de déchargement, auront une incidence sur ces coûts (Hmaeid, 2019; Nunes, Causer et Ciolkosz, 2020). En plus, si la biomasse forestière est destinée à la production de granules, elle passera par l'étape de la densification qui aura

pour but d'augmenter sa valeur calorifique. Par ailleurs, elle aura également pour conséquence de faire augmenter le prix associé à ce type de combustible, car des manipulations additionnelles doivent être faites. (Nature Québec, 2014a)

Par la suite, si la matière passe par un centre d'entreposage intermédiaire, la matière sera entreposée et conservée jusqu'à ce qu'elle soit acheminée chez le consommateur. Durant cette phase, sa qualité doit être préservée à travers de bonnes pratiques qui maintiendront l'ensemble de ses propriétés physico-chimiques (Hmaeid, 2019). De plus, en fonction des intentions de valorisation, chaque consommateur aura des besoins spécifiques quant aux caractéristiques de la matière (ex. humidité, granulométrie). C'est d'ailleurs pourquoi, à ce stade, elle doit être conditionnée et homogénéisée afin de répondre aux différents besoins de l'industrie. (FQCF, 2013) En guise d'exemple, les voies de valorisation par conversion thermique (ex. pyrolyse, gazéification) ont tendance à mieux fonctionner avec de la biomasse ayant un taux d'humidité autour de 10 % (Mansuy et al., 2018). Dans l'éventualité où la biomasse serait destinée à ces fins, il faudrait alors mettre en place les conditions propices à l'atteinte des exigences.

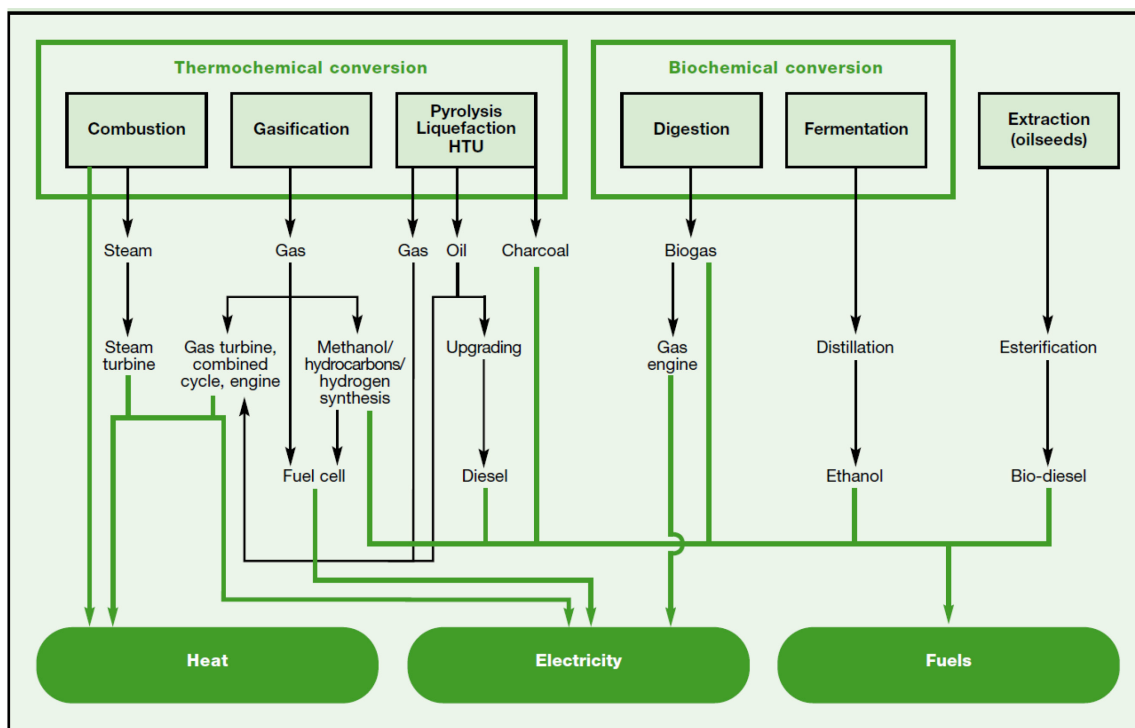
Certains risques sont associés à l'entreposage, dont une diminution de la qualité de la biomasse et une perte de matière sèche. D'ailleurs, plus long sera le temps d'entreposage et plus grand sera le nombre d'étapes d'entreposage, plus importante sera la quantité de matière perdue. (Nunes et al., 2020) Pour cette raison, il est préférable que la matière soit entreposée à l'abri des intempéries et dans un lieu où la circulation de l'air est bonne (Nature Québec, 2014a).

Finalement, la distribution s'effectue depuis le centre d'entreposage vers les installations de valorisation énergétique par l'intermédiaire de camions munis d'une remorque pour le vrac (Nature Québec, 2014a).

## **1.5 La valorisation énergétique**

La valorisation énergétique de la biomasse forestière est réalisée à l'aide de plusieurs procédés qui en finalité, produisent trois formes d'énergie : de la chaleur, de l'électricité ou du biocarburant (secteur des transports). Afin de valoriser la matière, plusieurs procédés sont actuellement disponibles. Ceux-ci se départagent principalement en deux catégories : les procédés thermochimiques (combustion, gazéification et pyrolyse/liquéfaction) et biochimiques (digestion et fermentation). Ces dernières sont illustrées à la figure 1.3. (Goldemberg, 2000)





**Figure 1.3 Aperçu des principales voies de valorisation thermochimiques et biochimiques de la biomasse**  
(tiré de : Goldemberg, 2000, p. 223)

Le rendement en termes de conversion en énergie de chacune de ces technologies varie et divers facteurs vont influencer le choix d'une de celles-ci, tels que :

- les besoins réels en énergie;
  - la disponibilité, la proximité, tout comme la qualité de la biomasse;
  - les coûts liés à la distribution puis à la transformation;
  - l'environnement dans lequel on se trouve;
  - les techniques mobilisables pour utiliser le produit final suite au procédé appliqué.
- (AQPER, s. d.)

Les technologies associées aux trois formes d'énergie ne sont pas toutes équivalentes en ce qui a trait à l'efficacité de conversion de la matière ligneuse en énergie (voir tableau 1.4). Il est possible de constater que la production de chaleur est une voie de conversion où l'efficacité de conversion est élevée et compétitive face aux technologies qui sont associées aux combustibles fossiles. Cet aspect doit être considéré étant donné qu' « une unité d'énergie contenue dans le bois n'équivaut pas à une unité de

consommation d'énergie, car l'efficacité de conversion de la biomasse forestière en une forme d'énergie utilisable dépend de la technologie utilisée. » (Paré et al., 2011)

**Tableau 1.4 Efficacité de conversion des technologies pour la biomasse forestière et autres types de combustibles** (compilation de : Walker et al., 2010; EcoTec, 2012; Thiffault et al., 2015)

Voie de valorisation		Efficacité de conversion
Biocarburants		40 % - 45 %
Électricité	Cogénération	25 % - 33 %
		85 %
Chaleur		75 % - 90 %
Autres types de combustibles		
Mazout lourd		65 %
Mazout léger		75 %
Propane		85 %
Gaz naturel		85 %
Électricité		100 %

### 1.5.1 Combustion directe

La combustion directe consiste essentiellement à brûler la biomasse forestière. Cette technique engendre l'entière oxydation à haute température (plus de 1000 °C) de la matière et nécessite un apport constant d'une grande quantité d'air. (Dufour, 2016) Cette matière, qui servira à alimenter les équipements de combustion, peut prendre la forme de plaquettes forestières, de granules de bois (à la suite de la densification), de résidus de scieries ou de bûches (ESIM, 2013). Cette pratique nécessite donc des installations adaptées telles qu'une chaudière, un générateur d'air chaud ou un four à bois (Hydro-Québec, 2014). Aussi, ce procédé a la capacité de produire séparément de la chaleur et de l'électricité, générée pendant le passage de la vapeur dans une turbine à vapeur, ou les deux simultanément. Dans ce dernier cas, on parlera alors de cogénération. (Dufour, 2016) D'ailleurs, en 2018 on dénombrait 13 usines de cogénération qui produisaient de l'énergie thermique et électrique au Québec (MFFP, 2018).

Plusieurs projets de production de chaleur sont en cours au Québec (section 4.2), ceux-ci fonctionnent généralement avec une chaudière qui est alimentée soit avec des plaquettes ou des granules (voir figure 1.4).



**Figure 1.4 Une chaudière (a), des plaquettes (b) et des granules (c)** (tiré de : Opérations forestières et de scierie, 2017; Nature Québec, s. d.; QWEB, s. d.)

### 1.5.2 Gazéification

La transformation de la biomasse sous hautes températures (900 à 1050 °C) en gaz de synthèse (*syngas*), décrit le procédé de gazéification qui se compose des étapes suivantes : séchage, pyrolyse, oxydation et réduction. Ces températures rendent optimale la production de gaz. (Mvolo, 2010) Le procédé va décomposer la matière carbonée et former un *syngas* essentiellement composé de CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>. D'abord, le *syngas* généré doit impérativement être dépollué du goudron; résultat direct de la gazéification. Ensuite, celui-ci peut, par exemple, être utilisé à des fins de production de chaleur ou d'électricité en étant brûlé, ou être converti par catalyses en hydrocarbures, comme le diesel ou le méthanol (avec le procédé Fischer-Tropsch) ou en gaz vecteurs d'énergie comme le dihydrogène (H<sub>2</sub>) et le méthane (CH<sub>4</sub>). (Dufour, 2016)

### 1.5.3 Pyrolyse/liquéfaction

Durant la pyrolyse, la matière sera décomposée en conditions de chaleur (500 °C) et d'absence d'oxygène (McKendry, 2002). Cette technique permet d'abord d'obtenir un gaz qui sera par la suite refroidi rapidement pour donner de l'énergie densifiée sous forme liquide, de la biohuile ou huile pyrolytique, pour ainsi faciliter son transport, son entreposage et son utilisation. Cette biohuile est en réalité un condensat liquide noir. (MFFP, 2011; Le Roux, 2015) Outre ce liquide, une fraction solide (biocharbon) est également obtenue, mais en quantités moindres. Effectivement, la fraction liquide représentera de 60 % à 70 % de la biomasse initiale, alors que les fractions solide et gazeuse équivalent à 15 et 20 % chacune. (MFFP, 2011) Cependant, certaines difficultés sont présentes lors de son utilisation en remplacement de carburants conventionnels en raison des propriétés physico-chimiques bien différentes de l'huile pyrolytique. Par exemple, celle-ci possède une forte teneur en eau et en composés oxygénés qui engendre

une grande teneur en oxygène (35 à 40 %) dans l'huile. Les composés oxygénés sont bien présents et font en sorte que la capacité calorifique de l'huile pyrolytique est 50 % moins grande que celle des carburants conventionnels. Outre cela, d'autres propriétés comme son acidité élevée (pH entre 2 et 3), sa viscosité instable et sa teneur en solide (particules fines) limitent le potentiel commercial de l'utilisation de ce produit à ce stade. (Le Roux, 2015)

Quant à la liquéfaction, celle-ci se produit à plus basse température (250 à 350 °C), mais à haute pression (10 à 20 Mpa) (Mvolo, 2010). Dès lors, il est possible de convertir directement la matière lignocellulosique en biohuile (Dufour, 2016).

#### **1.5.4 Digestion**

La digestion est la conversion de la biomasse par les bactéries en milieu anaérobique, donc en absence d'oxygène. Ce procédé génère du biogaz, composé essentiellement de méthane et de dioxyde de carbone. (McKendry, 2002) La composition complexe du bois nuit à l'efficacité de sa conversion en biogaz. En effet, la matière est naturellement résistante à la dégradation anaérobique et plusieurs alternatives de prétraitement (ex. l'élimination de la lignine et la diminution de la cristallinité de la cellulose) sont envisagées pour diminuer sa complexité et sa résistance. Plusieurs défis restent à surmonter pour améliorer le rendement de ce procédé. (Yang, Xu, Ge et Li, 2015)

#### **1.5.5 Fermentation**

Comme pour la conversion de la matière végétale provenant de l'agriculture (ex. maïs), la conversion de la matière ligneuse en éthanol fonctionne selon le même procédé de base, c'est-à-dire la conversion des sucres en alcool. De manière générale, ce procédé implique d'abord une réaction d'hydrolyse pour libérer les sucres simples : les monosaccharides. Par la suite, la fermentation et la distillation permettront de produire de l'éthanol cellulosique. (Eloutassi, Louaste, Boudine, et Remmal, 2014) Cependant, semblablement à la digestion anaérobique, la conversion de la matière lignocellulosique avec ce procédé devient plus difficile en raison de la nature de sa composition. En effet, plusieurs molécules polysaccharidiques à chaîne plus longue se trouvent dans le bois. Ceci se traduit nécessairement par un gain en résistance et une plus grande complexité pour la conversion en un produit énergétique. Cette difficulté est absente en ce qui a trait à la production de l'éthanol de première génération avec les matières végétales agricoles. À la fin, l'éthanol cellulosique sera propice à être utilisé dans le secteur des transports comme biocarburant. (McKendry, 2002)

Contrairement à l'éthanol de première génération, dont la matière première provient du secteur agroalimentaire (blé, maïs, etc.), l'éthanol de deuxième génération à base de matière lignocellulosique ne met pas de pression sur le domaine de l'agriculture et sur les denrées alimentaires. Le développement de cette filière est donc considéré comme étant plus durable : il n'interfère pas avec des enjeux de sécurité alimentaire. (O'donohue, 2008)

## **2. L'UTILISATION DE LA BIOMASSE FORESTIÈRE ET LES GAZ À EFFET DE SERRE**

Ce chapitre est dédié à la compréhension du rôle que la biomasse forestière peut occuper en termes de mitigation des changements climatiques par le biais de la production d'énergie, dans l'optique de se substituer aux énergies fossiles. Plus spécifiquement seront abordés différents aspects de l'élément chimique carbone, pour ensuite arriver à démontrer l'intérêt d'utiliser cette ressource renouvelable, notamment parce que le carbone qu'elle contient est d'origine biogénique. Par ailleurs, quelques mots seront dits sur la carboneutralité de la biomasse forestière. Enfin, l'objectif général est de montrer en quoi la biomasse forestière peut être un outil intéressant dans le contexte climatique actuel.

### **2.1. L'élément chimique : carbone**

Le carbone est l'élément chimique qui possède le numéro atomique 6. Il est représenté par le symbole C. Son noyau a donc six protons, mais possède un nombre variable de neutrons. De ce fait, le carbone possède plusieurs isotopes distincts : deux stables ( $^{12}\text{C}$  et  $^{13}\text{C}$ ) et cinq radio-isotopes. De ces derniers, seul le  $^{14}\text{C}$  est présent dans la couche superficielle de notre planète. (Amiel et Brusset, s. d.) De plus, l'isotope  $^{12}\text{C}$  est le plus abondant sur Terre. Il correspond à 98,9 % du carbone présent naturellement. Le carbone est présent dans toutes les molécules organiques. Sans lui, aucune forme de vie ne peut exister. (Manahan, 2009; Molles, Cahill, et Lauren, 2017) De plus, cet élément se retrouve dans beaucoup de composants, dont les roches calcaires et les combustibles (gaz, pétrole, charbon) (Amiel et Brusset, s. d.). Cependant, dans le contexte de ce chapitre, c'est plus particulièrement le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) qui est d'intérêt, soit la principale forme de carbone dans notre atmosphère (Bliefert et Perraud, 2009).

### **2.2. Le cycle biogéochimique du carbone**

Tout comme d'autres éléments ou composés chimiques abondants sur Terre (eau, azote, phosphore, hydrogène, etc.), le carbone a son propre cycle biogéochimique; celui-ci est illustré à l'aide de la figure 2.1. Ce cycle a lieu autant en zone océanique que continentale. Il décrit son comportement (transport et transformation) selon de nombreux processus physiques, chimiques et biologiques, à travers les grands ensembles, les réservoirs abiotiques et biotiques, que représentent l'atmosphère, l'hydrosphère, la biosphère et la lithosphère/asthénosphère. Aussi, bien que la majorité du carbone soit contenue dans la lithosphère et dans les eaux profondes des océans, la relativement faible quantité de carbone dans les couches superficielles de la Terre est tout de même absolument essentielle à la vie. Chaque molécule organique contient donc indispensablement du carbone. (Bourque, 2010a; Molles et al., 2017) La

productivité biologique et le climat sont deux éléments sur lesquels le carbone a une influence majeure (Bourque, 2010b).

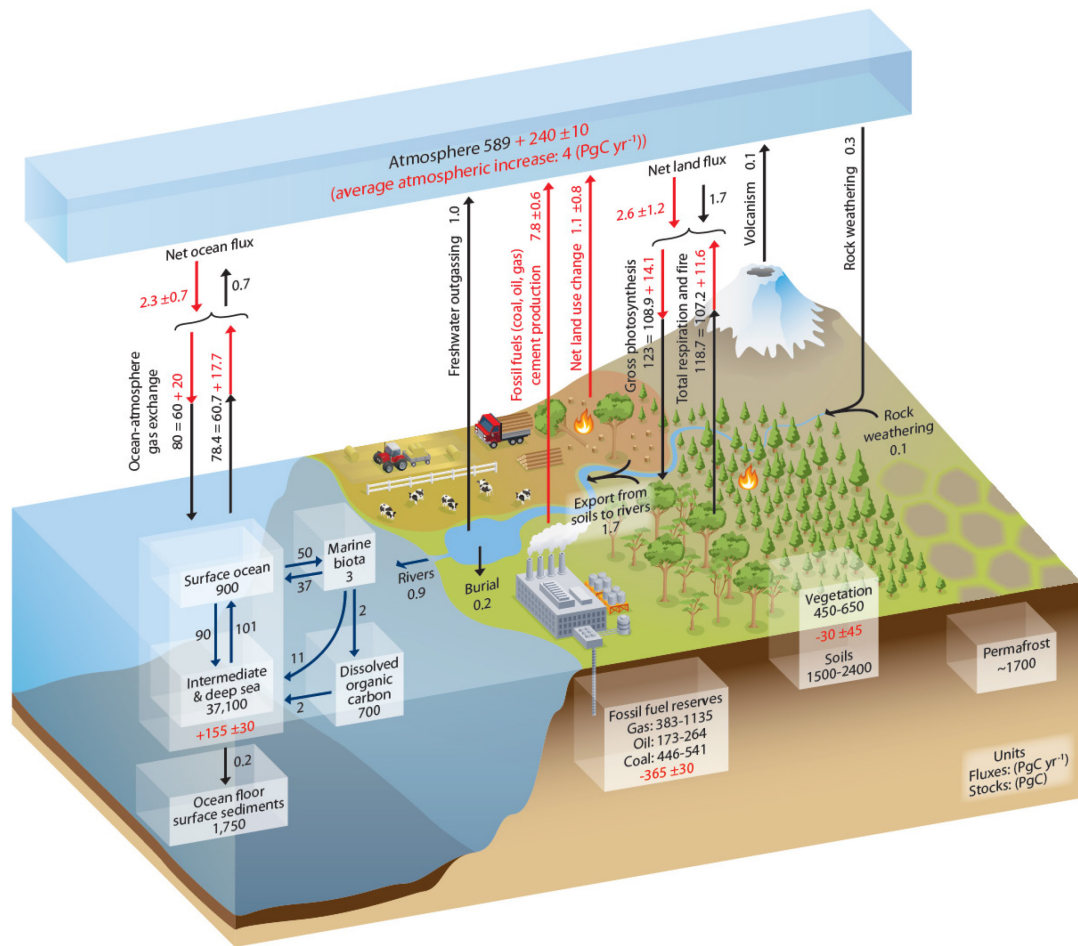


Figure 2.1 Le cycle du carbone simplifié (tiré de : IPCC, 2013, p. 471)

Le carbone se présente sous différentes formes dans les divers réservoirs. Par exemple, dans la lithosphère, il est majoritairement sous la forme de carbonates et de carbone organique, dans les sédiments. D'ailleurs, celui-ci est le plus grand réservoir de carbone. Ensuite, on le retrouve entre autres sous la forme d'hydrogénocarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) dans les océans, de  $\text{CO}_2$  ou de méthane ( $\text{CH}_4$ ) dans l'atmosphère et de carbone organique au sein de la biosphère. (Bliefert et Perraud, 2009)

Par ailleurs, au cours de ce cycle biogéochimique, les échanges entre l'atmosphère, la biosphère, l'hydrosphère et la lithosphère peuvent se faire à différentes échelles de temps selon un cycle court ou long. En effet, le temps de résidences du carbone, ou plutôt d'un atome de carbone, dans les réservoirs va beaucoup varier. À ce propos, il sera dans l'atmosphère durant 4 ans (régulé majoritairement à travers les

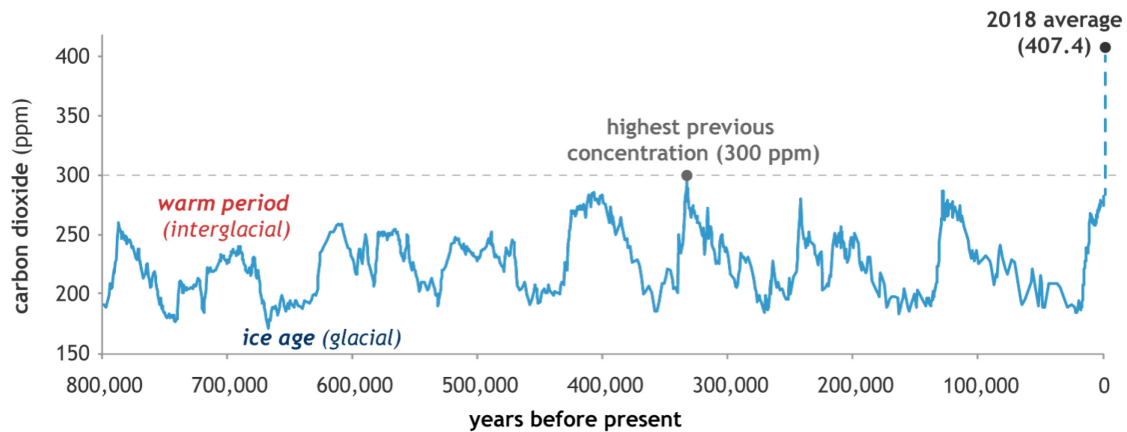
processus de photosynthèse et de respiration) et dans la biosphère durant 11 ans. (Bourque, 2010b) D'ailleurs, bien que l'atmosphère soit le plus petit réservoir de carbone, il est cependant le plus dynamique de tous (Chapin III, Matson, et Vitousek, 2012). En ce qui a trait à l'hydrosphère et la lithosphère, les temps de résidences sont encore plus longs, avec 384 ans (dans les 100 premiers mètres de l'océan) dans le premier cas et plus de 100 000 ans, voire des millions d'années dans le second. (Bourque, 2010b; Chapin, 2012)

### **2.3. Le rôle du carbone dans le réchauffement climatique**

Sans atmosphère terrestre, la température moyenne à la surface de la Terre chuterait de +15 °C à -18 °C. Sans cette particularité, la vie sur le globe aurait été compromise ou aurait été bien différente de celle que nous connaissons aujourd'hui. Cette capacité de notre atmosphère à donner lieu à un réchauffement est due au phénomène d'effet de serre provoqué par plusieurs gaz qui sont présents dans cette fine couche d'air, communément appelés : les gaz à effet de serre (GES). Ces GES sont en mesure de laisser passer une grande partie du rayonnement solaire et de bloquer les radiations réémises, sous forme de rayonnement infrarouge, par la surface terrestre. (Bliefert et Perraud, 2009) Les plus importants gaz de ce type sont entre autres : la vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O), le CO<sub>2</sub>, le méthane (CH<sub>4</sub>), l'ozone (O<sub>3</sub>) et l'oxyde de diazote (N<sub>2</sub>O). (VanLoon et Duffy, 2017)

Somme toute, l'effet de serre est naturel et même bien nécessaire. Cependant, depuis la période préindustrielle, les quantités de CO<sub>2</sub> émises dans l'atmosphère ont significativement augmentées en raison des activités humaines. Si bien que la concentration moyenne de CO<sub>2</sub> était de 407,4 parties par million (ppm) en 2018, tandis qu'elle était sous la barre des 200 ppm en 1750 (figure 2.2). D'ailleurs, de 1990 à 2008, le carbone d'origine anthropique a augmenté de 40 % dans l'atmosphère. (Chapin III et al., 2012) Effectivement, les activités humaines (combustion d'énergies fossiles (ex. secteur du transport et énergétique), changement de l'usage des sols (ex. déforestation), agriculture, etc.) ont un grand impact sur le cycle du carbone et plus particulièrement sur l'augmentation de la concentration du CO<sub>2</sub> atmosphérique (Gordan, 2008; Chapin III et al., 2012; IPCC, 2013; Molles et al., 2017). Ce fait est même validé et reconnu par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) qui est chargé d'analyser scientifiquement les questions concernant les changements climatiques (IPCC, 2013).





**Figure 2.2 Les concentrations globales de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) en partie par million (ppm) depuis les derniers 800 000 ans (tiré de : NOAA, 2020c)**

Ainsi : primo nous émettons plus de CO<sub>2</sub>; mais secundo, celui-ci représente le gaz le plus important des GES à long temps de résidence. D'une part, il est vrai qu'il absorbe moins de chaleur par molécule que par exemple, le méthane ou l'oxyde de diazote, mais d'autre part, son temps de résidence dans l'atmosphère est plus long et son abondance plus considérable. (NOAA, 2020c) L'état de fait précédemment décrit constitue, pour ainsi dire, la pierre angulaire de la problématique du réchauffement climatique. Il augmente nécessairement l'effet de serre et modifie le bilan radiatif terrestre, provoquant ultimement une hausse des températures moyennes à la surface du globe.

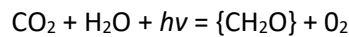
En ajout, le CO<sub>2</sub> n'agit pas de la même façon dans toutes les longueurs d'onde. En effet, son spectre d'absorption démontre qu'il absorbe le rayonnement infrarouge entre 14 et 19 µm, qu'il le bloque totalement aux alentours de 15 µm et l'absorbe hautement entre 4 et 4,3 µm. (VanLoon et Duffy, 2017) D'ailleurs, l'intervalle spectral 12,9-17,1 µm représente 20 % de l'énergie radiative émise par la Terre, c'est pourquoi la bande d'absorption à 15 µm du CO<sub>2</sub> joue un rôle non négligeable dans le bilan radiatif de la planète (Torlaschi, 2010).

#### **2.4. La séquestration du carbone par la forêt**

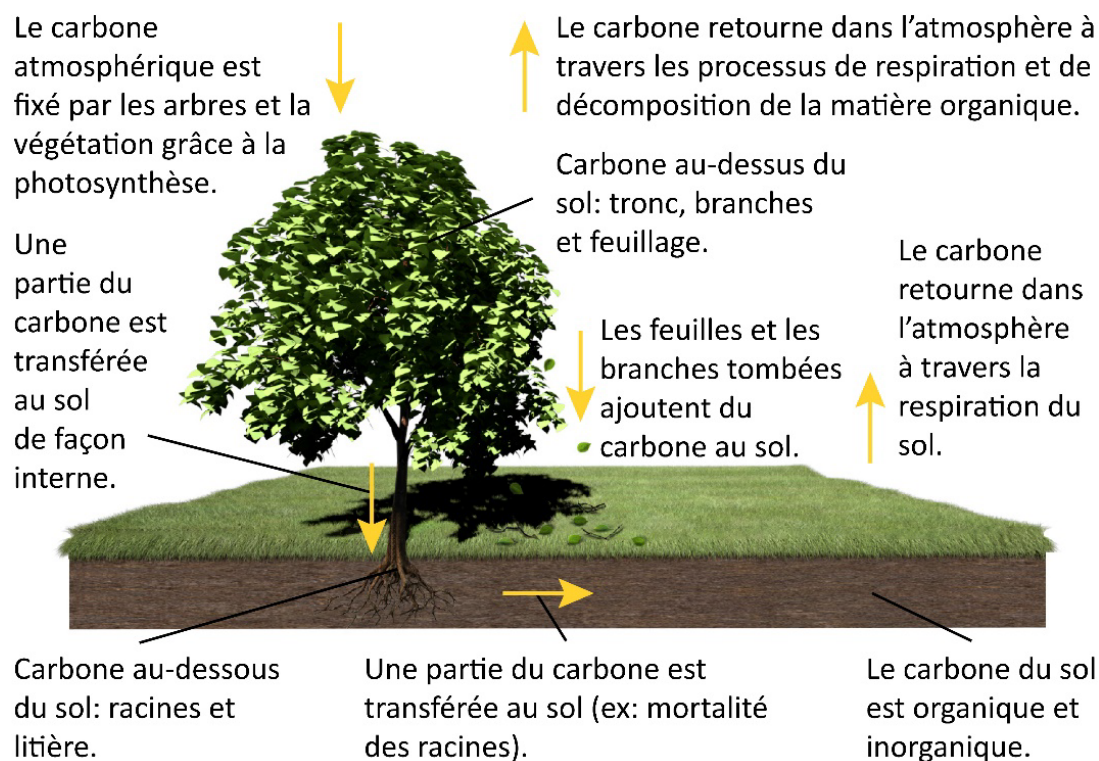
Un arbre est constitué à 50 % de carbone et celui-ci est réparti dans l'entièreté de sa biomasse (tronc, branches, feuilles et racines). Dans les cellules végétales se trouvent des parois cellulaires qui procurent entre autres un soutien structurel à la plante. Elles sont composées de cellulose et/ou de lignine qui nécessitent toutes deux du carbone pour être fabriquées. Ainsi, lorsqu'un arbre croît, il séquestrera inévitablement du carbone. Tout ceci est rendu possible grâce à la photosynthèse. Cette dernière

correspond à l'utilisation, par les plantes, du CO<sub>2</sub>, de l'eau (H<sub>2</sub>O) et du rayonnement solaire pour créer des glucides. Une certaine quantité d'oxygène (O<sub>2</sub>) est aussi relâchée dans l'atmosphère, comme un sous-produit de cette opération. (Sedjo et Sohngen, 2012)

Durant ce processus photosynthétique, les chloroplastes, présents dans les feuilles, captent l'énergie du rayonnement solaire se situant dans la partie visible du spectre électromagnétique, puis la transforme en énergie chimique (NADPH et ATP). Dès lors, cette énergie sera disponible au sein de la plante pour qu'elle puisse procéder à la fixation du CO<sub>2</sub> capté au départ par les stomates des feuilles. Ainsi, ce dioxyde de carbone sera alors transformé en glucides et donc synthétisé en matière organique ou, autrement dit, en biomasse. (Chapin III et al., 2012) L'équation suivante représente le processus de la photosynthèse. Dans cette équation l'énergie solaire est représentée par  $h\nu$  et la biomasse par {CH<sub>2</sub>O} (Manahan, 2009).



Une forêt est donc considérée comme un réservoir de carbone, étant donné qu'elle en séquestre une grande quantité dans les arbres qui la compose. Une partie du carbone capté est également transféré au sol de différentes façons (figure 2.3). On retrouve donc du carbone sous une forme organique et inorganique dans le sol. À ce propos, le temps de renouvellement du carbone au sein d'un arbre va grandement varier. En effet, au niveau du carbone fixé par photosynthèse dans les chloroplastes, celui-ci se renouvellera après quelques secondes seulement, en raison de la photorespiration. Ensuite, en ce qui a trait aux feuilles et aux racines, le temps de renouvellement se situera entre plusieurs semaines et plusieurs années. Finalement, on parle de décennies, voire même de siècles dans certains cas, pour le bois constituant la plante ligneuse. (Chapin III et al., 2012)



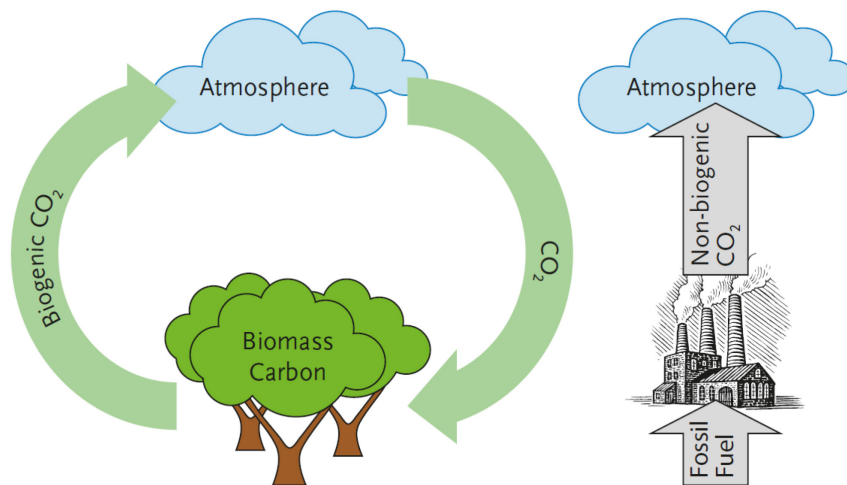
**Figure 2.3 Le cycle de la séquestration du carbone** (inspiré de : Conseil canadien des ministres des forêts, s. d.b, page 2. Production à partir de V-ray, Rhino et InDesign)

## 2.5. L'intérêt vis-à-vis de l'utilisation de la biomasse forestière à des fins énergétiques

L'intérêt de substituer les énergies fossiles avec l'énergie produite à partir de la biomasse forestière réside dans le fait que le carbone émis par la valorisation énergétique des résidus de bois va intégrer l'atmosphère, mais sera de nouveau capté par la forêt en régénération initialement exploitée. (Thiffault et al., 2015) Ainsi, après un certain temps, la quantité de CO<sub>2</sub> induites par la production d'énergie à partir du bois (ex. génération de chaleur par combustion) serait équivalente à la quantité de CO<sub>2</sub> séquestrée par la suite par les arbres de la forêt. On nomme alors carbone biogénique, le carbone provenant de la biomasse (voir figure 2.4).

Essentiellement, le carbone biogénique fait partie d'un cycle court où le renouvellement du carbone peut être de l'ordre de quelques décennies. Au contraire, les énergies fossiles font partie du cycle long du carbone, le renouvellement est ici plutôt de l'ordre des milliers ou millions d'années. Il n'est peut-être pas si long à l'échelle des temps géologiques, mais à l'échelle humaine, il est pratiquement linéaire. Ce qui n'est pas le cas avec la biomasse forestière, qui fait partie du cycle biogénique. De cette manière, lorsque

des énergies fossiles sont utilisées pour produire de l'énergie, le carbone émis passe du cycle long au cycle court, ce qui augmente obligatoirement la quantité totale de carbone atmosphérique, amplifiant le réchauffement climatique. (IEA, 2017) Ainsi, on remet en circulation du carbone ayant été séquestré il y a des millions d'années.



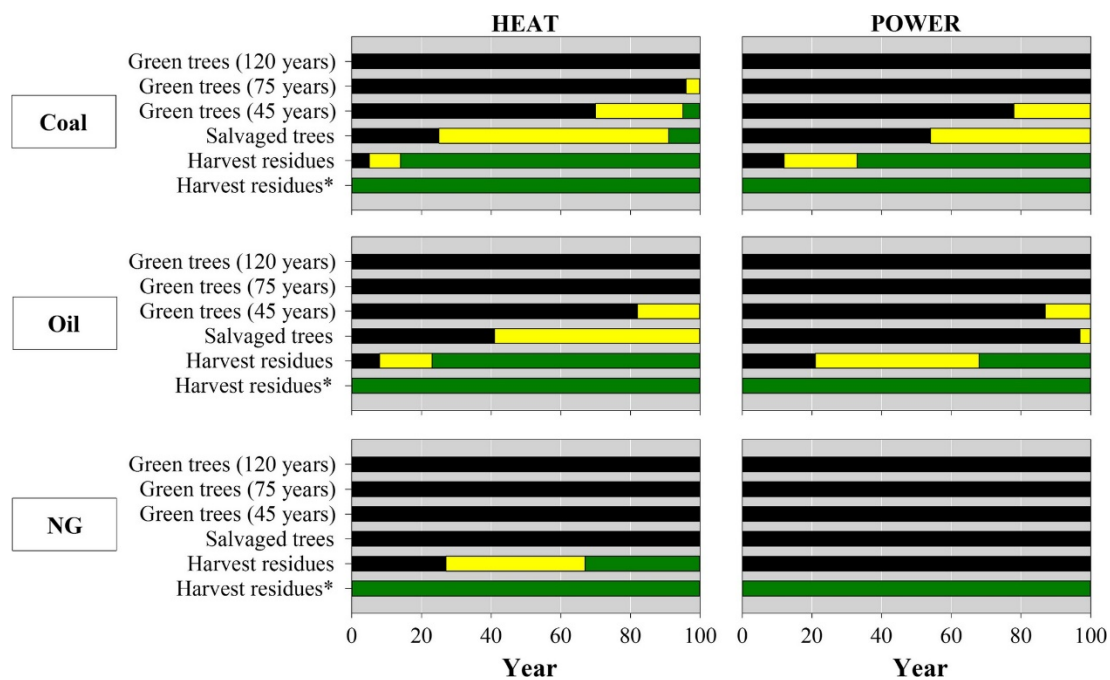
**Figure 2.4 Démonstration du cycle court (gauche) et du cycle long (droite) du carbone** (tiré de : NOAA, 2020c)

En outre, lorsqu'un arbre en forêt brûle à la suite d'un feu, ou qu'il meurt naturellement et se décompose par l'activité microbienne, le carbone séquestré dans sa matière est relâché à nouveau dans l'atmosphère sous la forme de CO<sub>2</sub>. Il s'agit du processus inverse de la photosynthèse. (VanLoon et Duffy, 2017) D'ailleurs, la même chose se produit quand les résidus de coupe sont laissés sur un site après la récolte du bois rond. Dans ces conditions, le CO<sub>2</sub> libéré par la valorisation énergétique du bois aurait été, d'une manière ou d'une autre, également libéré au bout d'un certain temps à la suite de la décomposition naturelle. Cette pratique ne fait que bénéficier des possibilités bioénergétiques tout en épargnant l'utilisation d'énergies fossiles à fortes émissions de GES et à cycle long du carbone.

## 2.6. La carboneutralité

La biomasse forestière a longtemps été considérée comme étant carboneutre (Walker et al., 2010; Paré et al., 2011; Timmons, Buchholz et Veeneman, 2016; Berndes et al., 2016). L'idée selon laquelle la combustion de la biomasse n'engendre aucune augmentation nette de GES dans l'atmosphère provient

du fait que les émissions seraient égales au carbone séquestré durant la croissance des arbres (Walker et al., 2010). Cependant, plusieurs nuances doivent être apportées, car la carboneutralité souvent associée à la biomasse forestière n'est pas aussi simple à déterminer. Dans les faits, on ne peut pas la déclarer carboneutre instantanément. Effectivement, de nombreuses études avancent que la dette de carbone engendrée par l'utilisation de la biomasse comme bioénergie peut mener à une augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> pendant une certaine période de temps (Johnson, 2009; Cherubini, Peters, Berntsen, Strømman et Hertwich, 2011; Hudiburg, Law, Wirth et Luyssaert, 2011; Lamers et Junginger, 2013; Mika et Keeton, 2015) En réalité, étant donné qu'à la suite de la combustion de la biomasse forestière la forêt prendra du temps à se régénérer et à capter à nouveau le carbone, il y a un délai à prendre en compte : une dette de carbone. Cette dette peut être courte ou longue à rembourser, tout dépendant du type de biomasse forestière utilisé (ex. arbres verts ou résidus de coupe) et de quelques autres facteurs, notamment du mode de conversion, du combustible fossile remplacé, de la productivité de la forêt ou de la vitesse de décomposition de la matière; la figure 2.5 le démontre (Thiffault et al., 2015; Laganière, Paré, Thiffault et Bernier, 2017). Plus de détails seront donnés au prochain chapitre.



\* Résidus brûlés en bordure du chemin au lieu d'être laissés à la décomposition naturelle dans le scénario de référence.

**Figure 2.5** Durée de la dette de carbone (en noir), de la période d'incertitude (en jaune) et des bénéfices de carbone (en vert) en fonction du combustible remplacé (NG : gaz naturel), du type de biomasse forestière et du mode de conversion (tiré de : Laganière et al., 2017)

Comme le démontre la figure précédente, plusieurs scénarios sont possibles et procurent des bénéfices GES soit à court (<10 ans), moyen (10 à 20 ans) et long terme (>20 ans). Effectivement, en utilisant des arbres verts par exemple, la dette de carbone pourrait prendre plusieurs décennies à être remboursée, donc sur le long terme. Cela est donc peu préférable et difficile à défendre étant donné qu'au moment de la récolte ces arbres continuaient en plus à séquestrer du carbone. Ensuite, à moyen ou long terme, on retrouve les arbres issus de perturbations naturelles. Leurs périodes d'incertitudes, illustrées à la figure 2.5, sont relativement étendues en raison du fait que ces arbres peuvent rester debout pendant une période de temps très variable avant de tomber au sol et de commencer un processus de décomposition plus actif. Enfin, les résidus de coupe peuvent commencer à générer des bénéfices GES dans un horizon à court terme. Dans certains scénarios, les dividendes peuvent débuter après seulement 5 ans. (Laganière et al., 2017) Dans la même échelle de temps, on retrouverait les résidus de la transformation du bois et les résidus CRD. Leur utilisation est donc également intéressante sur le plan environnemental. (Bernier et al., 2012)

En finalité, puisque la dette de carbone sera éventuellement remboursée, la biomasse forestière représente un net avantage vis-à-vis des énergies fossiles. L'intérêt de l'utilisation de la biomasse forestière comme source d'énergie ne devrait pas résider dans l'atteinte immédiate de la carboneutralité, mais dans le fait qu'elle peut faire mieux que les énergies fossiles conventionnelles en ce qui a trait aux émissions de GES une fois la dette carbone remboursée. L'absence d'une carboneutralité immédiate ne doit en rien motiver le ralentissement de cette filière énergétique au Québec.

### **3. ANALYSE DU DÉBAT SCIENTIFIQUE CONCERNANT LA CARBONEUTRALITÉ DE LA BIOMASSE FORESTIÈRE**

Au sein de la communauté scientifique internationale, il existe un débat entourant la carboneutralité de la biomasse forestière en tant que source d'énergie et, par conséquent, également autour de son rôle potentiel dans la mitigation des changements climatiques. Tandis que certains promeuvent sa neutralité carbone lors de son utilisation (Raymer, 2006; Sjølie, Trømborg, Solberg et Bolkesjø, 2010; Zhang, 2010), d'autres attestent le contraire en remettant en question cette carboneutralité (Bernier et al., 2012; Timmons et al., 2016). À ce propos, c'est Schlamadinger, Spitzer, Kohlmaier et Lüdeke qui, en 1995, ont pour la première fois remis en question ce concept associé à la bioénergie forestière. Puis, en 2009, Searchinger et al. ont relancé le débat en publiant un article nommé *Fixing a Critical Climate Accounting Error* dans la très reconnue revue américaine *Science*. Au cours des dernières années, de nombreuses publications, toutes positions confondues, sont parues et bien souvent il est difficile de cerner l'essence du message à travers ce bruit de fond de contradictions. Il est d'ailleurs important d'offrir un message clair aux décideurs, pour la prise de décision, plus particulièrement au niveau des politiques énergétiques à mettre en place. L'absence d'un consensus scientifique interfère avec la capacité des décideurs à faire des choix éclairés. C'est dans ce contexte que ce chapitre trouve sa pertinence, car il s'immiscera dans ce débat et portera un regard sur les raisons qui motivent, ou plutôt expliquent ces positions. Il sera vu que, de manière générale, la façon de procéder des scientifiques pour analyser le potentiel d'atténuation des émissions de GES a une incidence majeure sur la variabilité de leurs résultats.

#### **3.1. Des émissions de carbone biogénique**

La production de bioénergie à partir de la biomasse forestière est fréquemment déclarée comme étant une source d'énergie carboneutre, en ce sens qu'elle n'engendre pas d'augmentation nette de carbone dans l'atmosphère lors de sa combustion. Ça semble être le cas dans la mesure où il n'y a pas de déforestation, donc pas de changement d'usage du sol, et dans la mesure où la forêt fait l'objet d'une gestion durable pour ne pas engendrer de perte dans les stocks de carbone forestier. (WBA, 2012) Ce principe est surtout motivé par le fait que le carbone émis est d'origine biogénique et qu'il fait donc partie d'un cycle court, à l'opposé des énergies fossiles. Ainsi, cette carboneutralité s'appuie sur le fait que le CO<sub>2</sub> émis dans l'atmosphère lors de la combustion du bois est, après une certaine période de temps, recapturé par la forêt en régénération grâce à la photosynthèse. Ainsi, selon ce principe, à la suite de la combustion de la biomasse, la quantité de carbone émis dans l'atmosphère est égale à celle capturée lors de la

régénération de la forêt exploitée. Ces idées sont donc partagées par tous ceux qui appuient la carboneutralité de la biomasse forestière. (Walker et al., 2010; WBA, 2012; EPA, 2018) Bien que cette proposition soit à un certain niveau véridique, la capacité de la forêt à séquestrer du carbone étant reconnue dans la littérature scientifique depuis longtemps, elle constitue malgré cela, selon un grand nombre de scientifiques, une généralisation beaucoup trop simplifiée et rapide (Sedjo, 1989; Dixon et al., 1994; Bonan, 2008; Pan et al., 2011). En effet, elle fait abstraction d'une multitude de facteurs importants à inclure dans l'évaluation du bilan carbone comme la dette de carbone; la croissance de la forêt et la séquestration du carbone qui auraient eu lieu sans la production de bioénergie; les émissions de GES dues aux activités d'aménagement forestier, de récolte et de valorisation énergétique de la biomasse forestière; bref, à l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement qui nécessite bien souvent d'avoir recours aux énergies fossiles. Ces nuances sont, pour ceux qui rejettent la carboneutralité de la biomasse forestière, la base de leur position envers elle. (Schulze et al., 2012) En plus des précédents facteurs, Schlamadinger et al (1995) ajoutent que dans bien des cas l'efficacité de conversion des systèmes à la bioénergie est en deçà de ceux aux combustibles fossiles et que la récolte de la biomasse forestière peut induire une diminution des réserves de carbone dans le sol. Par ailleurs, il serait possible de considérer la biomasse forestière comme étant carboneutre uniquement si la matière ligneuse provient d'une plantation énergétique, et donc, que les arbres aient été initialement plantés à des fins bioénergétiques. (J, Laganière, échange de courriel, 6 mai 2020)

Malgré cela, dans certains pays comme les États-Unis, des efforts sont déployés pour promouvoir la neutralité carbone de la biomasse forestière (EPA, 2018). De ce fait, la *United States Environmental Protection Agency (EPA)* a déclaré en 2018 qu'elle considérait désormais la production d'énergie à partir du bois comme une source carboneutre d'énergie. Cette décision est prise à la suite de nombreuses années de réflexion en ce qui a trait à la façon de quantifier les émissions de carbone reliées à la combustion du bois et à la réglementation des centrales thermiques au bois. Subséquemment à cette déclaration politique, nombreux ont été les groupes environnementaux et experts à s'y opposer. Ceux-ci arguaient qu'il était scientifiquement incorrect d'apposer l'étiquette de la carboneutralité à la biomasse forestière. Cette décision controversée, que certains qualifient de précipitée, pourrait vraisemblablement s'expliquer par le fait que l'EPA subit depuis longtemps beaucoup de pression de la part des législateurs du Congrès et de l'industrie pour prendre une telle position. (Science News Staff, 2018) Tandis que l'industrie des produits forestiers et les propriétaires forestiers privés accueillent favorablement la décision, cette dernière pourrait donner un certain avantage à l'industrie vis-à-vis des énergies fossiles. Cela pourrait même aller jusqu'à engendrer une déréglementation des émissions de carbone en lien avec



la combustion de la biomasse pour la dégager de certaines dispositions de la *Clean Air Act*. (Mooney et Grandoni, 2018, 23 avril)

### **3.2. L'indissociabilité des émissions de carbone de la foresterie traditionnelle et de la bioénergie**

L'indissociabilité des émissions de carbone relatives à la foresterie traditionnelle et celles de la bioénergie est, selon Jérôme Laganière, un argument utilisé par certains permettant d'expliquer en partie la divergence des opinions au sein de la communauté scientifique. En effet, selon cet argument, la récolte du bois destiné au sciage, déroulage et aux pâtes et papiers, serait indissociable des activités de récolte de biomasse forestière pour la production d'énergie. Il faudrait donc les considérer comme un tout. En partant de cette idée, les bénéfices et émissions associées aux activités traditionnelles et bioénergétiques devraient être communs. Ainsi, lorsqu'on comptabilise les émissions et la séquestration de carbone pour un produit issu de la bioénergie, il faudrait considérer également les bénéfices GES associés aux produits du bois qui permettent de séquestrer du carbone sur une longue période, tels que le bois d'ébénisterie ou les matériaux de construction. Il faudrait aussi prendre en compte les bénéfices qui découlent de la substitution, par le bois, de matériaux dont la production engendre de fortes émissions de GES comme l'acier, le béton et le plastique. (J, Laganière, échange de courriel, 6 mai 2020)

### **3.3. Les lignes directrices du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat**

La carboneutralité de la biomasse forestière est aussi assumée en lien avec le GIEC. En effet, en 2006, le GIEC publiait *Les lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre (Les lignes directrices 2006)*. Ce document, d'ailleurs révisé en 2019, encadre l'élaboration des estimations des inventaires de gaz à effet de serre qui doivent être réalisées annuellement par tous les pays et présentées à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC). Il fournit donc une méthodologie spécifique, adoptée et reconnue par la communauté internationale, concernant la production des rapports de données nationales pour la comptabilisation des émissions et absorptions de GES. Il va sans dire que l'on parle ici des émissions et absorptions d'origine anthropique exclusivement. En fin de compte, ce document de référence permet d'homogénéiser tous les inventaires nationaux de GES afin de les rendre comparables. (GIEC, 2006) On peut d'ailleurs souligner, en guise d'exemple, qu'au Québec, le Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) prend en compte la méthodologie élaborée par le GIEC dans son *Guide de quantification des émissions de gaz à effet de serre* (MELCC, 2019).

Dans les *Lignes directrices 2006*, on englobe l'ensemble des émissions possibles à l'échelle nationale pour l'ensemble des activités, celles-ci sont été catégorisées par secteur :

- Énergie;
- Procédés industriels et utilisation des produits (PIUP/IPPU);
- Agriculture, foresterie et autres affectations des terres (AFAT/AFOLU);
- Déchets. (GIEC, 2006)

Alors, comment ce document peut-il contribuer à créer de la confusion quant à la carboneutralité de la biomasse forestière? Pour répondre à cette interrogation, il faut se pencher sur la façon de procéder qui est indiquée dans les *Lignes directrices 2006* pour réaliser la quantification des émissions de GES. Lorsqu'un pays veut comptabiliser ses émissions dans le secteur Énergie, il est mentionné dans le document du GIEC, plus spécifiquement dans le chapitre sur la combustion stationnaire, que les émissions de CO<sub>2</sub> provenant de la combustion de la biomasse ne sont pas incluses dans les totaux du secteur Énergie : elles y sont inscrites à titre purement informatif, contrairement aux énergies fossiles qui, elles, sont prises en compte. Ceci est fait comme tel dans l'unique but d'éviter un double comptage entre ce dernier secteur et le secteur AFAT. En effet, parce que les émissions et absorptions de dioxyde de carbone en lien avec l'utilisation de la biomasse à des fins énergétiques sont déjà incluses dans le secteur AFAT. On ne peut donc conclure à la carboneutralité de la biomasse par le simple fait que le secteur Énergie enregistre zéro émission en lien avec cette bioénergie. Ce n'est qu'un choix méthodologique, le GIEC ne suggère en aucun endroit la carboneutralité de ce type de bioénergie. Ceci peut cependant engendrer une mauvaise interprétation qui, dans la pratique, n'est pas fondée.

### **3.4. La remise en question de la carboneutralité**

Comme il a été souligné, plusieurs auteurs affirment que considérer la biomasse comme une source carboneutre de bioénergie est en réalité une erreur. Auparavant, cette idée était pourtant généralisée à l'ensemble de la production de bioénergie à partir de biomasse, tel que mentionné dans Timmons et al. (2016).

La création d'une dette carbone lors de la combustion de la biomasse forestière est régulièrement soulevée dans la littérature pour réfuter le concept de la neutralité carbonique; elle constitue un élément important de leur argumentaire. (Fargione, Hill, Tilman, Polasky et Hawthorne, 2008; Paré et al., 2011; Bernier et al., 2012; Holtsmark, 2012; Timmons et al., 2016; Laganière et al., 2017) Selon Laganière et al.

(2017), trois raisons motivent la remise en question de la carboneutralité. D’abord, la production d’énergie avec le bois émet plus de CO<sub>2</sub> que lorsqu’elle est produite par les énergies fossiles (produits pétroliers, gaz naturel, etc.), et ce, pour une même quantité d’énergie (GIEC, 2006; Laganière et al., 2017). Ceci est démontré dans le tableau 3.1. De plus, ce constat est d’ailleurs bien répandu chez les scientifiques (Walker et al., 2010; Bird, Pena, Frieden et Zanchi, 2012; Mitchell, Harmon et O’Connell, 2012). Cette différence importante est due à la plus faible densité énergétique du bois, il possède moins d’énergie par unité de carbone (Bernier et al., 2012).

**Tableau 3.1 Facteurs d’émissions de CO<sub>2</sub> par défaut pour la combustion stationnaire dans les industries énergétiques selon différents types de combustible (kg de CO<sub>2</sub> par TJ sur une base calorifique nette) (compilation de : GIEC, 2006; TEQ, 2019)**

Combustible	Facteur d’émission	Limite inférieure	Limite supérieure
Bois	112 000	95 000	132 000
Charbon	94 600	87 300	101 000
Mazout lourd	74 100	72 600	74 800
Mazout léger (no 1)	68 405	/	/
Mazout léger (no 2)	71 032	/	/
Propane	61 003	/	/
Gaz naturel	56 100	54 300	58 300
Essence automobile	69 300	67 500	73 000

Ensuite, lorsque le bois est récupéré et brûlé pour la production de bioénergie, qu’il s’agisse d’arbres verts ou de résidus de coupe, le processus de combustion libère le carbone séquestré plus hâtivement que ne l’aurait fait le processus de décomposition naturel, selon un scénario de référence où les arbres n’auraient pas été coupés ou que les résidus auraient été laissés sur le parterre de coupe (Laganière et al., 2017). Dans cette situation, le simple fait d’accélérer le relâchement du carbone dans l’atmosphère va participer à l’allongement de la dette de carbone. Enfin, une fois que le CO<sub>2</sub> est émis dans l’atmosphère, une période de temps est nécessairement avant qu’il soit recapturé et séquestré par la forêt. Ce délai n’est pas fixe, au contraire, il fluctue grandement et contribue à l’importance/la taille/la longueur de la dette, jusqu’à ce que celle-ci soit remboursée lorsque la forêt repousse et que le stock de carbone augmente. Le délai nécessaire à ce remboursement peut être de l’ordre de quelques années, de la décennie ou même du siècle dans certains cas. (Timmons, 2016; Laganière et al., 2017) En fin de compte, ces considérations font en sorte que l’utilisation de la biomasse forestière pour la production d’énergie peut engendrer une

augmentation momentanée des émissions de GES dans l'atmosphère, ce qui l'empêche d'être considérée comme carboneutre durant cette période. En revanche, sur le long terme, l'atteinte de la carboneutralité peut être réalisable, mais elle dépend d'une foule de facteurs. Par exemple, elle peut dépendre du type d'énergie générée (chaleur ou électricité), de l'énergie fossile de référence qui est remplacée (pétrole, gaz naturel, charbon, etc.) et des stratégies d'aménagement forestier qui sont envisagées. (Timmons et al., 2016) Malgré cela, certains, comme la *World Bioenergy Association*, une organisation non gouvernementale à but non lucratif qui travaille dans le secteur de l'énergie pour la promotion d'énergies renouvelables comme la biomasse, qualifient la dette de carbone comme étant un concept illégitime. Étant donné que le carbone qui crée cette dette se trouvait auparavant dans l'atmosphère, elle dit plutôt qu'il serait faux de conclure que la combustion de la biomasse augmente la quantité du carbone dans l'atmosphère terrestre : c'est le même carbone qui circule en boucle (WBA, 2012). Cependant, cette réflexion fait abstraction, d'une part, de la temporalité des émissions, et d'autre part, des facteurs ayant une incidence sur les GES émis durant le cycle de vie des produits forestiers énergétiques. Ces facteurs sont, par exemple, les émissions relatives à l'utilisation d'énergies fossiles (ex. transport) ou bien l'efficacité des technologies de conversion utilisées pour la production de bioénergie.

### **3.5. Différentes approches méthodologiques pour différents résultats**

Évaluer le rôle potentiel de la biomasse forestière dans la mitigation des changements climatiques est nécessaire afin de guider l'élaboration et la mise en œuvre des politiques sur la bioénergie. À n'en pas douter, l'avis des scientifiques est dans ce cas essentiel. Cependant, au lieu d'être canalisés, leurs points de vue diffèrent dans la littérature. Ces divergences s'expliquent principalement par le contexte des analyses et les objectifs spécifiques des études menées qui conduiront par la suite à des choix méthodologiques cohérents à la situation dans laquelle l'analyse s'insère (Berndes et al., 2016). Certaines études sont même fortement critiquées au niveau de leur méthodologie déficiente. À ce propos, le *Manomet Center for Conservation Sciences* publiait en 2010 un rapport sur la récolte et la valorisation énergétique de la biomasse (Walker et al., 2010). Toutefois, la méthodologie employée a fait l'objet de fortes critiques dans le domaine scientifique (Strauuss, 2011; Galik et Abt, 2012).

Ainsi, selon l'approche choisie, différentes conclusions seront tirées. Et comme les contextes et les approches sont multiples, ceci engendre une divergence des résultats et conclusions des études scientifiques qui se prononcent sur l'utilisation de la biomasse forestière dans une perspective bioénergétique. Le fait que les résultats, même contradictoires, peuvent dans une certaine mesure s'avérer justes lorsqu'ils sont considérés dans le contexte de l'étude et de la méthodologie déployée,

donnent lieu à une confusion certaine, notamment chez les décideurs politiques. (Berndes et al., 2016) Dès lors, afin de démontrer l'importance et l'influence de la méthodologie au sein des études, deux éléments méthodologiques seront pris en exemple : le choix des scénarios de références et les échelles temporelles et spatiales.

### **3.5.1. Le choix des scénarios de référence**

Pour commencer, le premier élément ayant une influence est le scénario de référence choisi. Il correspond à la normalité, en d'autres mots, au cours normal des affaires si la production de bioénergie n'avait lieu. Celui-ci sera alors établi et par la suite comparé à un scénario de bioénergie dans le but d'évaluer les bénéfices obtenus en matière de mitigation des changements climatiques, afin de déduire lequel les maximiseraient. Pour ce faire, une approche par analyse de cycle de vie (ACV) sera employée afin de mesurer l'ensemble des émissions possibles de GES. (Bernier et al., 2012) En guise d'exemple, un scénario de référence pourrait considérer que les résidus de coupe, générés par les activités de récolte du bois rond, resteraient sur le sol forestier et que l'énergie serait plutôt produite de manière conventionnelle, soit à l'aide de mazout. Le scénario de bioénergie, qui servira de comparatif, pourrait envisager de récupérer les résidus de coupe pour ensuite les valoriser énergétiquement, en remplaçant en totalité ou en partie le mazout du scénario de base. Le fait est que, selon ce que l'étude veut analyser pour répondre aux besoins, autant le scénario de référence que celui de bioénergie pourront différer. Il pourrait être décidé de valoriser des arbres verts dans le scénario de bioénergie. Ou encore, il pourrait être choisi d'analyser les bénéfices procurés par le remplacement du charbon, par exemple. D'autres paramètres, comme le choix du mode de conversion de la biomasse, vont également peser dans la balance. C'est pour cette raison que le contexte dans lequel l'étude s'implante, tout comme les divers paramètres utilisés dans la méthodologie, seront d'une grande influence. Il est impératif de bien les saisir pour être en mesure de situer les conclusions obtenues par les chercheurs. Dès lors, on constate que plusieurs variantes peuvent exister et que différents scénarios peuvent être utilisés. Les scénarios seront donc déterminés en fonction de la portée de l'étude et des objectifs spécifiques de cette dernière. (Berndes et al., 2016) Ainsi, les conclusions des études peuvent donc mener à des constats dissemblables et se prononcer différemment sur le potentiel de mitigation des changements climatiques de la biomasse forestière en tant que source d'énergie.

### 3.5.2. Les échelles temporelles et spatiales

L'adoption d'une échelle de temps et d'une échelle spatiale dans laquelle l'évaluation s'insérera est également un facteur non négligeable (Hammar, Stendahl, Sundberg, Holmström et Hansson, 2019). L'échelle temporelle correspond à la période de temps où seront évalués les bénéfices GES. Elle peut focaliser sur le court, moyen ou long terme, selon l'objectif de l'analyse effectuée. Cette notion de temps est capitale et doit être prise en considération durant l'interprétation des résultats d'une analyse, car l'absence de bénéfice GES après 25 ans, si cela était la fenêtre temporelle choisie, ne signifie pas qu'aucun bénéfice ne sera possible après 50, 75 ou voire 100 ans. (Berndes et al., 2016) En portant notre attention sur l'étude publiée en 2019 et réalisée par Serra et al., on remarque que la portée temporelle est effectivement influente. Cette étude avait comme objectif de déterminer s'il était possible d'observer une réduction des émissions de GES en remplaçant le gaz naturel conventionnel par un gaz naturel renouvelable à base de biomasse forestière (biomasse forestière résiduelle, résidus de la transformation du bois et matière ligneuse issue des perturbations naturelles), et ce, pour une production annuelle de 1 gigajoule (GJ) d'énergie pour une période de 100 ans. Les résultats démontrent entre autres que les bénéfices, avec l'utilisation des résidus d'usine et des résidus de coupe, commencent à s'accumuler après une période de temps variant entre 15 et 75 ans dans les pires cas, en prenant en compte les incertitudes des données. Ceci démontre que dans l'éventualité où l'étude aurait orienté son analyse à court terme, par exemple sur 25 ans, les conclusions auraient pu être tout autre, car la fenêtre temporelle observée aurait été différente. Dans ces conditions, elle aurait probablement conclu que le remboursement de la dette de carbone avec les résidus de coupe est incertain, même si à plus long terme des bénéfices évidents auraient été atteints.

L'échelle spatiale, quant à elle, va délimiter géographiquement la zone à l'étude. D'ailleurs, Galik et Abt (2012) proposent six degrés d'échelle d'évaluation, soit :

- État (*State*);
- Zone d'approvisionnement (*Procurement Area*);
- Propriétaire foncier individuel (*Individual Landowner*);
- Parcelles multiples/forêt aménagée (*Multiple Plots/Managed Forest*);
- Parcelle individuelle aménagée (*Individual Managed Plot*);
- Parcelle individuelle non aménagée (*Individual Unmanaged Plot*).

Autrement, on voit d'autres auteurs qui font plutôt mention d'une terminologie différente pour désigner les échelles d'évaluation, tels que le *stand-level* (au niveau du peuplement) et le *landscape-level* (au niveau du paysage) (Lamers et Junginger, 2013; Berndes et al., 2016; Hammar et al., 2019). Le choix de l'une ou l'autre de ces échelles spatiales aura comme impact de circonscrire à la fois la zone à l'étude, mais aussi, par la force des choses, les données incluses et exclues dans l'évaluation. Évidemment, dans le contexte d'une étude, si une mauvaise échelle d'évaluation est choisie volontairement afin d'orienter les résultats, cela aura pour effet de déformer la réalité. (Galik et Abt, 2012) En fait, c'est en partie ce qui a été reproché au rapport du Manomet Center for Conservation Sciences. Effectivement, Strass (2011) critiquait le fait que l'analyse effectuée par le rapport a adopté une perspective à petite échelle, celle du peuplement forestier (*stand-level*). Seuls les peuplements forestiers qui sont soumis à la récolte de la biomasse ont été considérés, excluant les peuplements intacts. Dans ces conditions, le modèle utilisé dans le rapport induit une diminution du stock de carbone forestier après chaque opération de récolte. (Walker et al., 2010) De plus, cela veut aussi dire que seule la régénération des arbres situés sur la parcelle où a été faite la récolte peut participer au remboursement de la dette carbone, à la suite des émissions de CO<sub>2</sub> biogénique. Ainsi, on fait abstraction du fait que la forêt est un système interrelié et que du carbone est stocké à l'extérieur du peuplement forestier sélectionné. Une perspective au niveau du paysage aurait été plus appropriée selon ceux qui en font la critique. (Strass, 2011)

L'échelle d'évaluation au niveau du peuplement est souvent utilisée pour faire l'estimation de l'impact carbone de certaines opérations spécifiques, comme la récolte d'arbres touchés par une perturbation naturelle ou la récolte des résidus à la suite d'une coupe finale, toujours dans une situation de production de bioénergie. L'analyse peut être effectuée à long terme, par exemple sur une ou plusieurs rotations du stock ligneux, ou à court terme, si tel est l'objectif de la politique bioénergétique élaborée. Quant à l'échelle d'évaluation au niveau du paysage, elle est utile pour considérer l'écosystème forestier dans son intégralité, et donc, pour considérer les variations du stock de carbone global. Elle peut par exemple servir à déterminer comment la modification de certaines pratiques dans l'aménagement forestier, ou la récolte de la biomasse forestière, peut avoir une incidence sur la réserve de carbone dans l'ensemble. (Berndes et al., 2016)

### **3.6. Discussion**

Le débat sur la carboneutralité de la biomasse forestière a certainement lieu d'être, mais celui-ci ne doit pas pour autant limiter le développement et l'utilisation de la bioénergie à partir de la biomasse forestière, sous le seul prétexte qu'elle ne constitue pas une source d'énergie carboneutre. L'emphasis devrait plutôt

être mise sur les bénéfices de réduction des émissions de GES que peut procurer la matière ligneuse dans un contexte bioénergétique, et donc, sur le rôle qu'elle peut jouer dans la mitigation des changements climatiques en remplaçant les énergies fossiles fortement émettrices. Effectivement, l'utilisation de la biomasse forestière comme source d'énergie est envisageable même si une dette carbone se crée et que plusieurs années peuvent s'écouler avant qu'elle soit remboursée et que des dividendes commencent ensuite à s'accumuler. De ce fait, « l'enjeu ici n'est donc pas de démontrer qu'un gain existe, mais plutôt de savoir quand ce gain se manifestera, et quelle en sera l'ampleur. » (Bernier et al., 2012) À ce propos, afin de maximiser les bénéfices, il est avantageux d'utiliser les technologies de conversion énergétique les plus efficaces, comme la production de chaleur ou même la cogénération, le bilan énergétique étant moins bon lors de la conversion en électricité ou en biocarburant, de même que de remplacer les énergies fossiles qui ont les plus grands facteurs d'émissions de CO<sub>2</sub>. En ordre de priorité : le charbon, le mazout lourd, le mazout léger, le propane et le gaz naturel. (GIEC, 2006; Bernier et al., 2012; FCQF, 2018).

La contribution de la bioénergie à la mitigation des changements climatiques est fortement dépendante du contexte dans lequel elle s'implante et de la chaîne de valorisation dans laquelle elle s'insère. Cela est dû au fait que plusieurs facteurs vont varier géographiquement et temporellement (Berndes et al., 2016; Woo et Turner, 2019). Ainsi, une étude évaluant le potentiel de réduction des émissions de GES doit toujours être considérée dans le contexte régional où elle a été réalisée et en prenant en compte la méthodologie utilisée, car elle a une grande influence sur les résultats et les conclusions. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle il est ardu de comparer les études entre elles. Malgré tout, la recherche dans ce domaine est importante pour renseigner et guider les décideurs politiques sur les bonnes pratiques à adopter afin d'amoindrir l'impact climatique de l'utilisation de cette ressource.

Enfin, les bénéfices GES ne sont évidemment pas le seul facteur à prendre en considération pour déterminer l'intérêt de développer la filière de la biomasse forestière. Effectivement, dans un souci de durabilité, il est primordial d'analyser également les enjeux relatifs à l'environnement, l'économie et la société associés à l'utilisation de cette ressource. Cela sera fait au chapitre 5.



## **4. LA SITUATION ÉNERGÉTIQUE DU QUÉBEC**

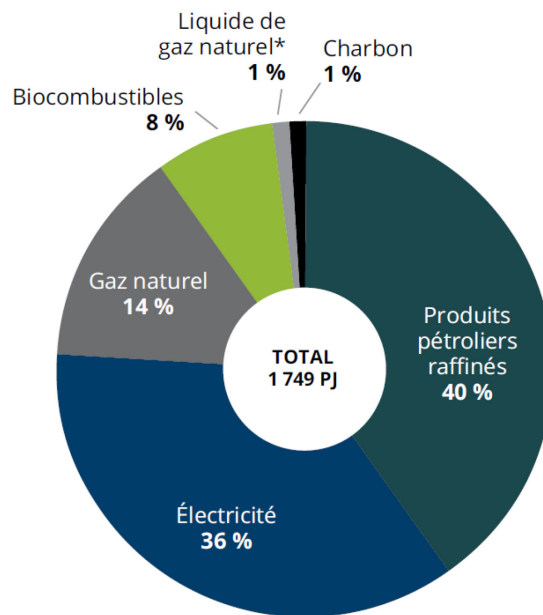
Ce chapitre permettra de porter un regard sur l'état de l'énergie au Québec afin d'en brosser un portrait général. Ce portrait permettra, d'une part, de mettre en lumière la place importante qu'occupent les énergies fossiles dans l'arsenal énergétique de la province et, d'autre part, de démontrer la nécessité d'opérer la décarbonation du secteur de l'énergie. Enfin, certains projets énergétiques réalisés avec la biomasse forestière seront décrits afin de démontrer concrètement comment cette ressource peut être utilisée dans différents secteurs d'activités.

### **4.1. Un portrait de l'énergie**

En 2017, la consommation énergétique annuelle totale au Québec pour l'ensemble des secteurs d'activités était de 1 749 PJ. Par secteur, cette consommation est proportionnellement répartie comme suit : industrie (33 %), transport (30 %), résidentiel (19 %), commercial et institutionnel (11 %), usage non-énergétique (5 %) et agriculture (2 %). La présence d'industries fortement énergivores sur le territoire est un élément de réponse à la haute consommation d'énergie dans le secteur industriel québécois principalement en raison de l'industrie de l'aluminium et des métaux non-ferreux, mais aussi dans une moindre mesure, des industries manufacturières et des pâtes et papiers. En rapportant la consommation totale sur la population, on obtient un résultat par habitant de 194 GJ. Cela classe les Québécois parmi les plus grands consommateurs d'énergie au monde, au deuxième rang, juste avant les États-Unis (193 GJ) et derrière le Canada (222 GJ) qui est en première position. (Whitmore et Pineau, 2020) Ce classement peut probablement s'expliquer en partie à cause du fait que l'exploitation des sables bitumineux en Alberta a un impact substantiel sur les émissions de GES du Canada et que le Québec subit des hivers certainement plus rigoureux qu'aux États-Unis; la demande en énergie va de pair avec, entre autres, ce dernier facteur.

L'énergie provient de nombreuses sources primaires autant renouvelables que non-renouvelables (voir figure 4.1). D'ailleurs, malgré l'apport important d'Hydro-Québec avec l'hydroélectricité de ses 63 centrales, la province de Québec est encore fortement dépendante des énergies fossiles. Dans les faits, en 2017, 56 % de l'énergie consommée découlait des hydrocarbures comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel et le liquide de gaz naturel. (Whitmore et Pineau, 2020) À ce propos, le pétrole brut, le gaz naturel et les liquides de gaz naturel (LGN) sont acquis sur le marché de l'importation; le Québec n'en produisant pas sur son territoire. (Régie de l'énergie du Canada, 2020) En 2019, l'approvisionnement en pétrole brut du Québec provenait entièrement du Canada et des États-Unis. Plus précisément, 62 % venait des voisins du sud et 38 % de l'Ouest canadien par le biais des sables bitumineux. Cette situation se distingue

grandement de celle que l'on pouvait observer il y a quelques années seulement (annexe 1). Depuis la venue massive du pétrole de schiste américain et en raison de l'inversion, en décembre 2015, de la ligne 9B de la compagnie canadienne Enbridge qui se spécialise dans le transport de pétrole par oléoduc, les circonstances sont toutes autres. Auparavant, les importations étaient beaucoup plus variées. Antérieurement, du pétrole brut était acheminé au Québec depuis la Norvège, le Royaume-Uni, l'Algérie, l'Angola et de plusieurs autres pays. (Whitmore et Pineau, 2020) Par ailleurs, la province a toutefois les installations requises pour la production de produits pétroliers raffinés (PPR) (essence, carburant diesel, mazout, charges pétrochimiques, etc.) à partir du pétrole brut qu'elle achète sur le marché de l'importation. Deux grandes raffineries sont en activité, celle de Montréal, appartenant à Suncor et celle de Lévis, propriété de Valero. (Régie de l'énergie du Canada, 2020) Elles ont à elles deux une capacité de 402 milliers de barils par jour (kb/j), ce qui équivaut à 20 % de la capacité du pays tout entier. D'ailleurs, comme la consommation quotidienne québécoise est de 365 kb/j, la province subvient à ses propres besoins en matière de PPR. (Whitmore et Pineau, 2020)



**Figure 4.1 Consommation totale par forme d'énergie et par secteur d'activité au Québec en 2017** (tiré de : Whitmore et Pineau, 2020)

En ce qui a trait à la production d'électricité, celle-ci est bien entendu dominée par l'hydroélectricité (95 %) et, de façon plus marginale, elle est également produite par l'éolien (4,7 %), la biomasse (0,7 %), le diesel (0,2 %) et le solaire (0,001 %). À défaut d'être utilisée en grande quantité pour la production d'électricité,

la biomasse forestière est davantage employée à des fins de production d'énergie thermique au Québec. La biomasse forestière produite sur le territoire québécois est majoritairement utilisée par le secteur industriel (68 %) : c'est-à-dire en grande partie par les industries des pâtes et papiers et de la transformation du bois davantage dans une optique de production de chaleur. Ainsi que, dans une moindre mesure, par le secteur résidentiel qui consommerait plutôt 32 % de cette biomasse par l'entremise du bois de chauffage encore largement utilisé. (Whitmore et Pineau, 2020)

Le secteur de l'énergie qui comprend sa production, son transport et sa consommation, est à l'origine de la grande majorité des émissions de GES à l'échelle du Québec, soit 71 %. Comme l'impact de la production d'électricité au moyen de l'hydroélectricité peut être qualifié de marginal au niveau des émissions de GES, les émissions sont plutôt imputables à l'utilisation des énergies fossiles, principalement le pétrole, suivi du gaz naturel. Au total, durant l'année 2017, ce sont 79 Mt d'équivalent CO<sub>2</sub> (éq. CO<sub>2</sub>) qui ont été émises au Québec, soit une baisse de 9 % par rapport aux chiffres de 1990 et une faible augmentation de 0,4 % par rapport à l'année 2016. De ce total, 46 % est attribuable à l'industrie (36 Mt), 43 % au transport (34 Mt) et 11 % aux bâtiments résidentiels, commerciaux et institutionnels (9 Mt). Ajoutons que les émissions du secteur industriel comprennent à la fois les émissions liées aux procédés industriels (10 Mt), mais également aux industries agricoles (8 Mt) et aux émissions fugitives de la gestion des déchets (4 Mt). En outre, en considérant maintenant que le secteur de l'énergie est la plus grande source d'émissions de GES dans la province et que 54 % (1 116 PJ) de l'énergie produite est perdue (principalement de la chaleur) pendant les étapes de transformation, transport et consommation, il serait d'intérêt de miser sur la diminution de ses émissions tout comme sur l'amélioration de l'efficacité du système. En effet, ce n'est que 46 % de l'énergie produite qui comble nos besoins énergétiques. (Whitmore et Pineau, 2020)

L'état de la situation de l'énergie au Québec précédemment dépeint confirme la nécessité d'opérer une transition énergétique misant notamment sur le remplacement des énergies fossiles par des sources d'énergies renouvelables à faible impact carbone. À ce propos, le gouvernement du Québec a récemment publié le *Plan directeur en transition, innovation et efficacité énergétiques du Québec 2018 – 2023*. (MERN, 2018) Celui-ci établit des cibles à l'horizon 2023, soit :

- « Améliorer de 1 % par année l'efficacité énergétique moyenne de la société québécoise;
- Abaisser d'au moins 5 % la consommation totale de produits pétroliers par rapport au niveau de 2013. » (MERN, 2018)

Cependant, les résultats anticipés sont plus élevés, à savoir de 1,2 % par année pour l'efficacité énergétique et de 12 % annuellement pour la consommation totale de produits pétroliers. Aussi, afin de rendre possible l'atteinte de ces cibles, le gouvernement effectuera plus de six milliards de dollars d'investissements, 225 mesures énergétiques étalées sur cinq ans et 15 feuilles de route pour l'atteinte des objectifs de 2030. (MERN, 2018) Ce plan directeur s'insère dans le contexte de la *Politique énergétique 2030* déposée en 2016. Cette dernière offre une vision à l'horizon 2030 des changements nécessaires pour opérer la transition énergétique. Elle touche autant à l'économie faible en carbone qu'à la mise en valeur des ressources énergétiques, la consommation responsable, l'efficacité énergétique et l'innovation technologique et sociale. (MERN, 2016) Les cibles sont :

- « amélioration de 15 % de l'efficacité énergétique;
- réduction de 40 % de la quantité de produits pétroliers consommés;
- élimination de l'utilisation du charbon thermique;
- augmentation de 25 % de la production totale d'énergie renouvelable;
- augmentation de 50 % de la production de bioénergies. » (MERN, 2016)

En somme, d'importants efforts devront être faits pour atteindre les cibles de la *Politique énergétique 2030*, de même que pour mettre fin à l'utilisation des énergies fossiles dans nos systèmes énergétiques, ce qui est un changement crucial pour restreindre l'augmentation des températures terrestres sous la barre des 2°C d'ici 2100 par rapport à l'ère préindustrielle (MERN, 2016). C'est également crucial pour atteindre la cible climatique visant à une réduction de 37,5 % des émissions de GES d'ici 2030, par rapport aux mesures de 1990 (MERN, 2018). Il est donc impératif de réaliser une transformation majeure de ces systèmes, particulièrement en sachant que la consommation de produits pétroliers a augmenté de 10 % au courant de la période 2013-2018 et en constatant leur présence encore trop grande dans l'arsenal énergétique du Québec. (Whitmore et Pineau, 2020) Le développement de la filière de bioénergie est donc un outil non négligeable afin de nous donner les moyens de nos ambitions. D'ailleurs, dans le 5<sup>e</sup> rapport du GIEC, il est démontré que sans la bioénergie, le risque de ne pas rencontrer les cibles climatiques à long terme est élevé (IPCC, 2014).

#### **4.2. Exemples de projets énergétiques à la biomasse forestière**

Dans les dernières années, plusieurs projets énergétiques à la biomasse forestière se sont concrétisés, tant en milieu industriel, commercial, municipal, qu'institutionnel. Ceux-ci se sont tranquillement implantés

dans l'ensemble des régions administratives. Les trois projets présentés et ici détaillés sont tous des projets de chauffage à la biomasse. Le premier étant l'hôpital d'Amqui, le second la municipalité de Causapsal au Bas-Saint-Laurent et le troisième celui des Serres Bertrand dans les Laurentides, pour ne nommer que ceux-là. De nombreuses autres initiatives sont nées un peu partout au Québec : la Cité Verte (Capitale-Nationale), les Planchers des Appalaches (Montérégie), l'école secondaire Sieur-de-Coulonge (Outaouais), la Fromagerie Boivin (Saguenay-Lac-Saint-Jean), etc. (Vision Biomasse, Québec, s. d.) Cette section démontrera comment la biomasse forestière peut être intégrée dans toutes sortes de secteurs d'activités et avoir un impact sur la réduction des émissions de GES, tout comme sur la diminution des coûts énergétiques à long terme.

Le marché de la production de chaleur est fort intéressant au Québec, notamment à cause de la réalité climatique à laquelle la province est soumise. Dans le cadre des secteurs institutionnel, commercial et industriel présents dans le tableau 4.1, le potentiel de substitution énergétique au Québec serait de 11 848 GWh pour le mazout lourd, le mazout léger et le propane. Il serait possible de tirer avantage de tout ce potentiel, car il est inférieur au potentiel de la biomasse forestière résiduelle (21 456 GWh). (FQCF, 2013)

**Tableau 4.1 Potentiel de substitution énergétique pour les différentes formes d'énergie au Québec (en GWh)** (inspiré de : FQCF, 2013)

	Mazout lourd	Mazout léger	Propane	Total	%
Bâtiments institutionnels	186	806	75	1 064	9
Bâtiments commerciaux	519	2 151	383	3 053	25,8
Agricole et agroalimentaire	0	308	1 288	1 596	13,5
Manufacturiers	1 876	3 918	306	6 100	51,5
Mines	0	0	34	34	0,3
<b>Total</b>	<b>2 578</b>	<b>7 183</b>	<b>2 087</b>	<b>11 848</b>	<b>100</b>

Les bâtiments institutionnels sont, entre autres, les écoles, les hôpitaux et les municipalités, tandis que les bâtiments commerciaux sont constitués, par exemple, des multi-locatifs, des résidences pour personnes âgées et des concessionnaires automobiles.

#### 4.2.1. Hôpital d'Amqui

En 2009, lorsque l'hôpital d'Amqui a décidé de convertir son système de chauffage au mazout lourd à la biomasse forestière résiduelle, l'établissement était parmi les premiers à réaliser un projet de la sorte au Québec. Situées aux portes de la Gaspésie, les installations sont depuis le commencement sous la gestion de la Coopérative forestière de la Matapédia qui effectue l'entretien, les réparations et les manutentions

sur les dispositifs qui chauffent le bâtiment de 11 000 m<sup>2</sup>. (Vision Biomasse Québec, s. d.; Frigon, 2013) Au total, ce sont deux chaudières alimentées aux plaquettes de bois (1 000 tonnes anhydres par an) et une réserve souterraine qui ont été installées; un projet qui représente un investissement initial de 1,260 million de dollars (Fournier, 2019, 12 octobre). Ainsi, auparavant chauffé à l'électricité (90 %) et au mazout (10 %), l'hôpital répond maintenant à 100 % de ses besoins en chauffage avec la biomasse forestière; sa consommation annuelle est de 3 675 000 kWh. La première unité de gazéification thermique est de 500 kW tandis que l'autre est de 800 kW. Cet état de fait permet à l'établissement une bonne flexibilité quant à l'adaptation de ses besoins énergétiques qui varient en fonction de la saison. (Frigon, 2013) En somme, les changements apportés engendrent une réduction des frais de chauffage de 125 000 \$ par année (Vision Biomasse Québec, s. d.). Dès lors, après quelques années seulement, le projet est financièrement rentable et dégage des bénéfices intéressants. Sans oublier que selon une ACV comparative réalisée par Laurent (2014), les émissions de GES de l'hôpital d'Amqui ont considérablement diminué; elles sont 2,4 fois moins élevées qu'avec l'ancien système de chauffage à l'électricité et au mazout en considérant que les émissions biogéniques ne sont pas incluses dans ce calcul. Le mazout, malgré sa faible contribution (10 %) dans le système précédent, contribuait pourtant à 60 % des émissions. En tout et pour tout, en ce qui concerne la production de 1 GJ de chaleur, le chauffage actuel à la biomasse forestière émet  $5,7 \pm 1,0$  kg éq. CO<sub>2</sub>, alors que celui à l'électricité et au mazout lourd en émettait  $13,5 \pm 2,8$  kg éq. CO<sub>2</sub>; une nette amélioration du bilan carbone. (Laurent, 2014)

#### **4.2.2. Municipalité de Causapscal**

La municipalité de Causapscal au Bas-Saint-Laurent a mis en place le premier réseau public de chauffage à la biomasse forestière. C'est en 2012 qu'a eu lieu l'inauguration de la chaudière de 500 kW. Celle-ci alimente - en réseau, grâce à des conduites souterraines - cinq bâtiments publics, dont l'hôtel de ville, l'aréna et la salle communautaire. (Vision Biomasse Québec, s. d) De plus, de l'énergie est vendue à l'école primaire et à l'église de la municipalité. Des économies de 46 000 \$/an sont faites grâce à cet investissement qui, en finalité, permet de réduire les émissions de GES de 254 tonnes annuellement. (FQCF, 2018; Vision Biomasse Québec, s. d.) Le système de chauffage précédent fonctionnait au mazout. Plus précisément, 80 000 litres de combustible devaient être utilisés pour répondre aux besoins en énergie. Désormais, il ne reste plus qu'un système de chauffage d'appoint au mazout de 5 000 litres qui accompagne le système principal fonctionnant avec 504 tmv de biomasse forestière par année.

#### **4.2.3. Serres Bertrand**

Le chauffage à la biomasse forestière séduit aussi le secteur agroalimentaire, comme le démontre le cas des Serres Bertrand basé dans les Laurentides. Une chaudière de 6 000 kW y a été installée pour combler les besoins énergétiques substantiels reliés à leurs opérations. De plus, conjointement à l'installation d'une chaudière, un nouveau réservoir d'hydro-accumulation a été installé. Ce dernier distribue l'eau chaude dans la totalité du réseau de chaleur qui dessert 6,6 ha de superficie bâtie. D'ailleurs, comme le système de combustion à la biomasse est équipé d'un dépoussiéreur très performant et d'un filtre à manches, les propriétaires peuvent se servir de résidus CRD afin d'alimenter la chaudière même si le bois contient de la colle. Au bout du compte, l'entreprise les Serres Bertrand réduit ses émissions de GES de 8 248 tonnes et fait des économies de 1 303 175 \$, à chaque année. (Vision Biomasse Québec, s. d.)

#### **4.3. Potentiel de réduction des émissions de GES des projets de combustion à la biomasse**

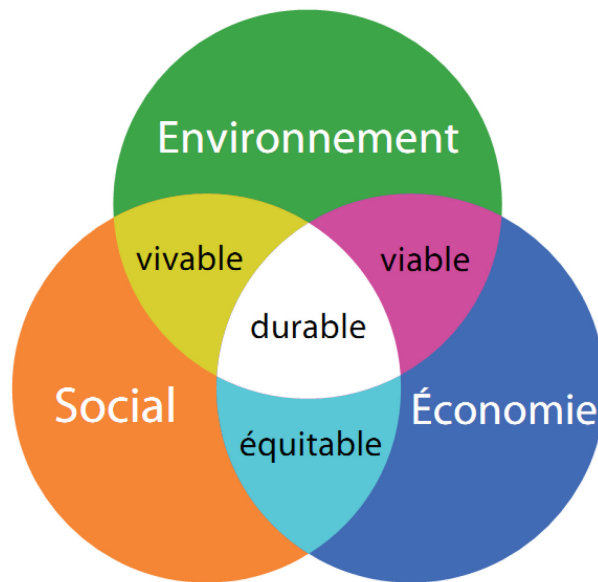
Afin de stimuler la filière du bois-énergie, le gouvernement du Québec a procédé en 2017 à la relance du programme Biomasse forestière résiduelle. Grâce à ce dernier, le gouvernement du Québec soutient le développement des bioénergies visant à la réduction des émissions de GES à court terme. D'ailleurs, en consultant les fiches de suivi des actions du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques, il est possible d'avoir accès aux données en lien avec les projets de conversion énergétique à la biomasse forestière financés par le Fonds vert et de comptabiliser l'impact environnemental de ceux-ci. Ainsi, en date du 30 septembre 2019, les différents projets ayant fait l'objet d'un appui financier représentaient un potentiel de réduction des émissions de GES de 73 811,82 tonnes de CO<sub>2</sub> éq. à l'échelle de la province, et ce, sur une base annuelle. Ceci équivaut aux émissions de CO<sub>2</sub> de 19 475 voitures ayant parcourues 20 000 km avec une consommation de 8 litres par 100 km (Carbone boréal, s. d.). Dans ce total, 144 projets ont été pris en compte, pour une moyenne de 512,58 tonnes de CO<sub>2</sub> éq. par projet et par an. Il faut cependant considérer que les données utilisées pour réaliser ce bilan sont incomplètes. Elles représentent malgré cela la meilleure information disponible lorsque l'on veut se pencher sur l'impact du programme ainsi que des projets de combustion à la biomasse forestière résiduelle qui en découle.

## 5. LES ENJEUX QUÉBÉCOIS DE L'UTILISATION DE LA BIOMASSE FORESTIÈRE

Il a été vu précédemment que la biomasse forestière peut participer à la réduction des émissions de GES de différentes façons. Elle représente donc une solution efficace, parmi d'autres, pour décarboner le secteur de l'énergie en plus d'avoir l'avantage d'être renouvelable. Pour donner suite à ce constat intéressant dans un contexte de changements climatiques et dans le but de déterminer si cette filière énergétique est durable, il est primordial de se questionner sur les principaux enjeux relatifs à son utilisation au Québec. Non seulement les enjeux relatifs à l'environnement, mais également ceux qui concernent la société et l'économie, soit les trois piliers du développement durable. Cette démarche est obligatoire afin de s'assurer que l'utilisation d'une telle ressource se fasse en harmonie avec les principes de durabilité. De plus, elle permet de prévenir les effets pervers, qui constituent des conséquences inattendues par rapport à l'objectif initial de diminution des émissions de GES. Ainsi, l'intention du présent chapitre et du suivant sera de tenter de répondre à la question suivante : est-ce que l'utilisation de la biomasse forestière peut s'insérer dans une démarche de développement durable au Québec?

Le développement durable est bien souvent associé à la définition suivante : « un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs. » C'est le rapport de la *Commission mondiale des Nations unies pour l'environnement et le développement* qui l'a popularisé lors de sa publication en 1987 (La Commission mondiale des Nations unies pour l'environnement et le développement, 2014). Il est plus communément connu sous le nom du rapport Brundtland. À l'époque, ce dernier avait mis en lumière différentes problématiques en lien avec la croissance économique démesurée, l'exploitation des ressources naturelles, la pauvreté et la détérioration de l'environnement. Ainsi, le rapport Brundtland constitue un document phare dans le domaine de l'environnement et du développement durable. D'ailleurs, il ne se contentera pas de faire le constat des problématiques auxquelles la planète était confrontée dans les années 80, il proposera également des solutions pour tendre vers la durabilité dans toutes sortes de sphères (énergie, écosystèmes et espèces, sécurité alimentaire, démographie, etc.). Au Québec, la *Loi sur le développement durable* a adopté la définition qui découle de ce rapport, mais en plus, elle y a ajouté le segment suivant : « Le développement durable s'appuie sur une vision à long terme qui prend en compte le caractère indissociable des dimensions environnementale, sociale et économique des activités de développement. » Aujourd'hui, ces trois dimensions sont fondamentales à la notion de développement durable, elles y sont indissociables. La figure 5.1 schématise ce concept.





**Figure 5.1 Les sphères du développement durable** (tiré de : SADC, s. d.)

On peut avancer que trois principes doivent être pris en compte dans le développement durable. Ceux-ci peuvent être décrits de la façon suivante :

- « Maintenir l'intégrité de l'environnement pour assurer la santé et la sécurité des communautés humaines et des écosystèmes;
- Assurer l'équité sociale pour permettre le plein épanouissement des humains, l'essor des communautés et le respect de la diversité;
- Viser l'efficacité économique pour créer une économie innovante et prospère. » (SADC, s. d.)

Considérant ces éléments, il est possible de comprendre que, dans le cadre de cet essai, l'analyse des enjeux reliés à la biomasse forestière doit être effectuée en fonction des dimensions environnementale, sociale et économique, afin de bien s'insérer dans cette vision de durabilité. À noter que, étant donné que la production d'énergie à partir de la biomasse forestière au Québec se fait principalement par combustion, l'analyse des enjeux sera volontairement teintée par cette réalité, quoique plusieurs de ces enjeux puissent tout aussi bien s'appliquer aux autres voies de conversion connues.

## 5.1. Les enjeux environnementaux

L'utilisation de la biomasse forestière pour la production de bioénergie comporte son lot d'enjeux environnementaux qu'on ne peut négliger : ils pourraient avoir un impact considérable sur la durabilité de la filière bois-énergie. Ceux-ci concernent, entre autres, tout ce qui a trait aux opérations de récolte de la biomasse forestière résiduelle en forêt. À ce moment, des impacts, notamment sur la biodiversité, la qualité des sols et de l'eau, peuvent se manifester. Heureusement, ces questions ont sollicité l'intérêt de beaucoup de chercheurs dans les dernières années. Ainsi, la compréhension de ces enjeux est beaucoup mieux qu'elle l'était autrefois, même si elle est encore incomplète. Les connaissances acquises permettent de cibler des moyens d'éviter ou d'atténuer leurs impacts en offrant des lignes directrices. Il sera vu, entre autres, que les impacts potentiels sur l'environnement vont grandement varier en fonction de la sensibilité du site et de la quantité de biomasse forestière résiduelle collectée. Dans ces conditions, il est infaisable de généraliser les enjeux et leurs impacts sur le milieu à l'ensemble de la forêt boréale. Corollairement, différents scénarios seront bien souvent mentionnés afin de démontrer les conditions menant à une plus grande ou une moins grande sensibilité à la récolte.

### 5.1.1. Biodiversité

En forêt, le bois mort fait partie intégrante des écosystèmes. De nombreuses espèces végétales et animales l'utilisent. Il remplit également diverses fonctions écologiques, d'où l'importance de considérer les conséquences potentielles sur la biodiversité à la suite du retrait de la biomasse forestière des parterres de coupe. Autant le bois mort encore debout, communément appelé chicot, que les débris ligneux sur le sol forestier (troncs, branches, houppiers, etc.) ont une valeur au sens de l'écosystème. Par exemple, certaines espèces d'oiseaux, comme le canard branchu (*Aix sponsa*) ou l'hirondelle bicolore (*Tachycineta bicolor*) ont besoin des chicots et des cavités naturelles qu'ils peuvent offrir, lors de la période de nidification. Les débris ligneux au sol sont également utilisés par les champignons et les insectes lors de la phase de décomposition du bois et par divers mammifères, petits et gros, en guise d'abri. Différents types de bois mort (degré de décomposition, caractéristiques structurales, espèce et taille) répondront à différents types d'utilisateurs (ex. mammifères, oiseaux, reptiles, amphibiens, insectes et champignons). De plus, chez ces mêmes utilisateurs, différents types de bois mort correspondront à certains de leurs besoins spécifiques tout au long de leur cycle de vie, lesquels peuvent varier. Nombreuses sont les espèces saproxyliques (ex. scarabées, lichens et champignons), celles dont la vie sera totalement ou en partie dépendante du bois mort, et même non-saproxyliques (ex. araignées, carabidés, acariens et mammifères),

pour lesquelles le bois mort joue un rôle majeur ou de plus petite importance dans leur cycle de vie. Les espèces saproxyliques sont également reliées entre elles par de nombreuses interactions trophiques, qui mises ensemble, forment le réseau saproxylique dans lequel le bois mort occupe un rôle fondamental. Dans ce réseau, on retrouve essentiellement les décomposeurs, soit les champignons, les bactéries et les détritivores, c'est-à-dire les êtres vivants qui s'alimentent des débris ligneux. (Boué, 2018). En ajout, du côté végétal, le bois mort à un stade avancé de décomposition peut même servir de substrat de germination et d'établissement chez certaines espèces ligneuses, herbacées ou hépatiques (Angers, 2009). En forêt boréale, ce n'est pas moins de 25 % des espèces qui dépendent du bois mort, soit pour leur alimentation ou pour leur habitat (Michel et Robert, 2008). Au Québec, plusieurs espèces fauniques sont associées de diverses façons aux arbres sénescents, aux chicots, aux souches et aux débris ligneux. En somme, ce sont 63 espèces d'oiseaux (oiseaux de proie, canards, pics, etc.), 17 espèces de mammifères, 8 espèces d'amphibiens et 6 espèces de reptiles qui utilisent le bois mort soit pour nicher, s'abriter, s'alimenter, tambouriner, parader ou excaver (creuser des cavités). De même, il est pertinent d'ajouter qu'une partie de celles-ci (23) sont des espèces à statut précaire. Par exemple, la chauve-souris nordique (*Myotis septentrionalis*), la couleuvre à collier (*Diadophis punctatus edwardsii*) et la rainette faux-grillon de l'Ouest (*Pseudacris triseriata*). (Land, Perreault et Dion, 2015)

Enfin, l'importance du bois mort en milieu forestier est bien admise et celle-ci atteste l'intérêt certain qui doit lui être octroyé dans un contexte où l'exploitation des résidus forestiers pourrait s'accroître. Cela ouvre également à la réflexion quant aux possibles implications dommageables pour la biodiversité si le bois est retiré à des fins de valorisation énergétique. Le précédent paragraphe démontre aussi la complexité et le dynamisme des relations qui relient les utilisateurs et les types de bois mort que l'on retrouve en forêt. En somme, encore trop peu d'études ont été effectuées pour nous permettre d'avoir un portrait détaillé et clair des impacts sur la biodiversité au Québec. Surtout en considérant la complexité de la question à répondre, notamment en ce qui concerne la compréhension des effets indirects, qui s'ajoutent aux effets directs, en raison des interactions entre espèces (Laigle, 2018). À cela, s'ajoute la complexité relative au nombre d'organismes vivants qu'il faut prendre en compte. Il s'agit d'un nombre considérable, même à l'unique regard de la biodiversité du sol. Malgré tout, un certain nombre d'études ont été réalisées à ce sujet, dans des contextes comparables à ceux du Québec, par exemple, en Fennoscandie où il existe un plus long historique de pratiques d'aménagement intensives et de récolte de biomasse forestière (Stockland, 2011). Cette littérature scientifique peut être utilisée afin de mettre en évidence les impacts possibles sur la biodiversité. Cependant, comme le souligne Riffell, Verschuyt, Miller et Wigley (2011) les impacts sur la faune peuvent varier en fonction des spécificités physiographiques de

la région concernée dans une étude, du niveau de rétention de biomasse, du temps écoulé depuis la dernière récolte de bois et de l'échelle spatiale à laquelle est faite l'étude. Il faut donc toujours considérer les données dans leur contexte d'étude. Dans ces conditions, il est difficile d'extrapoler les résultats d'une étude spécifique à une autre réalité dans le but d'obtenir réponse aux questionnements relatifs aux impacts de la récolte de biomasse forestière sur la biodiversité. Il est parfois également complexe de confronter les diverses études adressant la situation. La littérature peut cependant fournir un portrait général des répercussions qu'il serait possible d'observer.

Le prélèvement massif de biomasse forestière a pour conséquence de diminuer les habitats ainsi que les ressources des espèces saproxyliques et non-saproxyliques. Additionnellement, peuvent apparaître des pressions exercées sur ces espèces en raison de la réduction du bois mort ce qui pourrait avoir comme effet d'augmenter la compétition entre les utilisateurs. Cette compétition sera également accentuée par la réduction de la connectivité entre les habitats que constituent les débris ligneux. (Boué, 2018) Effectivement, le retrait des débris ligneux entre les souches résiduelles contribuerait à la création d'îlots isolés, donc au morcellement des habitats, affectant ainsi les organismes qui les utilisent et limitant, dans certains cas, leur occurrence. La perte d'habitat est un risque majeur pour la biodiversité; il est admis qu'à l'échelle mondiale, il s'agit du facteur qui affecte le plus la biodiversité (Brooks et al., 2002). Il va de soi qu'en récoltant la biomasse forestière, on réduit nécessairement le nombre et la qualité des habitats forestiers. Ainsi, par le fait même, on affecte de façon directe la biodiversité. Chez les espèces, à la suite d'une perte d'habitat, ce sont généralement deux réactions qui sont possibles, soit une diminution graduelle ou une diminution drastique et rapide des individus, pouvant éventuellement mener à une disparition. Au sein des espèces qualifiées de plus sensibles, les effets d'une perte d'habitat peuvent être assez immédiats. Même que, dans certains cas, ils peuvent survenir en amont, et donc, avant même la destruction totale de l'habitat. (Rompré, Boucher, Bélanger, Côté et Robinson, 2010) Par ailleurs, cette pratique a aussi des répercussions sur la richesse spécifique des espèces saproxyliques, c'est documenté. À ce propos, une étude réalisée par Thorn et al. (2016) au sud-est de l'Allemagne, dans le parc national de la forêt de Bavière, a permis de démontrer la relation entre le retrait de bois mort et la baisse de la richesse spécifique. Cette diminution du nombre d'espèces au sein de la parcelle touchée serait causée par l'augmentation en importance de la compétition exclusive et l'intensification des filtres environnementaux. Dans ce cas de figure, l'observation de ces résultats précédait un retrait de 15 % de la biomasse initialement disponible. Toujours selon cette étude, en ce qui a trait aux espèces non-saproxyliques, aucun résultat significatif ne démontre une telle relation à ce niveau.

## Champignons

Comme mentionné précédemment, les écosystèmes forestiers accueillent une exubérance d'organismes vivants, rendant ardue l'évaluation à une échelle fine des impacts d'un prélèvement sur la biodiversité. Il est plus aisé d'aborder la question en fonction des grandes catégories de taxon dans lesquelles ces organismes s'insèrent. Au niveau des champignons, leur importance en tant que décomposeurs n'est plus à débattre. Ils décomposent la matière ligneuse et participent donc à différents cycles biogéochimiques d'éléments comme le carbone et l'azote. La récolte de la biomasse forestière a un impact direct sur le milieu de vie de champignons comme les polypores (*Polyporus*). Le bois mort présente les conditions qu'il leur faut pour leur développement (Thiffault et al., 2015). Comme les espèces de polypores ont une relation étroite avec le bois mort, sa diminution pourrait avoir un impact considérable sur celles-ci (Penttilä, Siitonen et Kuusinen, 2004). De plus, les effets sur la diversité fongique pourraient ne pas être généralisés à tous les types de peuplements forestiers et à toutes les espèces de champignons. Effectivement, les travaux de Stockland (2011) effectués en Norvège ont démontré que la richesse spécifique par unité de surface serait plus affectée dans les forêts d'épinettes que dans les forêts de pins et que certaines espèces de champignons sont moins susceptibles d'être affectées que d'autres. Au reste, en fonction des caractéristiques du bois mort en forêt (ex. bois grossier (>10cm de diamètre), bois fin (<10cm de diamètre), stade de décomposition, espèces d'arbres) certains organismes fongiques seront plus adaptés et auront une préférence à certains types de débris (Boué, 2018). Par exemple, Butin et Kowalski (1983) ont démontré que l'espèce de champignon *Fusicoccum quercus* Oudem. s'établit davantage dans les débris ligneux dont le diamètre se situe entre 1 et 3 cm. Une espèce peut très bien préférer les débris fins, tandis qu'une autre se retrouvera uniquement dans les débris grossiers. On constate ainsi que, de façon générale, une variabilité des caractéristiques du bois mort en forêt est nécessaire afin de soutenir la pluralité des espèces fongiques et surtout, que la récolte des débris ligneux grossiers et fins peut mettre à risque le développement et le maintien d'une diversité fongique, en plus de mettre à risque leur abondance dans l'écosystème par le biais de la soustraction d'une condition qui est vitale à leur développement en forêt : le bois mort.

## Oiseaux

En 2011, Riffell et al. publiaient une méta-analyse combinant les résultats d'une série d'études (68) qui visait à déterminer les effets de la récolte intensive de biomasse dans les forêts de l'Amérique du Nord sur la biodiversité. Les conséquences du retrait de chicots, de débris ligneux grossiers et fins ont entre autres été étudiées sur plusieurs taxons : oiseaux, petits mammifères, reptiles, amphibiens et invertébrés. En ce

qui a trait aux oiseaux, il a été observé qu'à la suite du retrait de chicots et de débris ligneux grossiers, s'est ensuivie une baisse de la diversité dans les communautés d'oiseaux et une diminution de l'abondance des guildes d'oiseaux partageant la même niche écologique. D'ailleurs, le même constat a été fait lorsque seulement les débris ligneux grossiers ont été retirés. Ceci suggère qu'un retrait de biomasse forestière résiduelle, dans le cadre d'une exploitation à des fins bioénergétiques, pourrait avoir des impacts néfastes sur l'abondance et la diversité des oiseaux, du moins à l'échelle du peuplement forestier et dans une perspective de court terme. Ceci est également soutenu par les travaux de Lohr, Gauthreaux et Kilgo (2002). De plus, lors de la période de nidification, il a été démontré que les espèces d'oiseaux excavateurs de cavités (ex. *Picidae*), les utilisateurs secondaires de cavités d'arbres et les espèces non cavicoles étaient tous affectés par une diminution des chicots et des débris grossiers, à différents niveaux. Les oiseaux qui n'utilisent pas les cavités seraient plus particulièrement touchés lors du retrait de débris grossiers. Ceux-ci répondent à certains de leurs besoins comme ceux de communiquer, se percher et chercher la nourriture. En ajout à cela, l'enlèvement de cette matière ligneuse aurait pour conséquence de faire décroître l'abondance en invertébrés, ce qui diminuerait la qualité de l'habitat des oiseaux. Des cinq taxons pris en compte dans la méta-analyse, les oiseaux et les invertébrés se trouvent à être les plus susceptibles à ce type de changement dans l'écosystème forestier. (Riffell et al., 2011) En contrepartie, les résultats obtenus par Grinde, Slesak, D'Amato et Palik (2020) ne démontrent pas que la rétention de débris ligneux est un indicateur efficace dans la prédiction des modèles de communautés d'oiseaux et même de petits mammifères. Encore une fois, plusieurs facteurs peuvent influencer ces résultats, notamment le niveau de rétention de biomasse forestière à la suite des opérations de récolte et le moment où l'étude a été menée à la suite des travaux forestiers. Par exemple, on pourrait s'attendre à ce que l'impact sur la biodiversité soit plus significatif directement après une récolte, que 7 ou 8 ans après, comme ce fut le cas pour l'étude de Grinde et al. (2020) au Minnesota. En revanche, la rétention d'arbres debout sur le parterre de coupe a fait ses preuves et s'avère avoir un effet positif sur les oiseaux, du moins à court terme, quelques années suivant une coupe.

### **Petits mammifères**

Chez les petits mammifères, les débris ligneux grossiers sont des éléments importants dans l'habitat de certaines espèces, comme le campagnol à dos roux (*Myodes gapperi*) et la souris sylvestre (*Peromyscus maniculatus*). Ces débris leur permettent, entre autres, de se mettre à l'abri des prédateurs. (Etcheverry, Ouellet et Crête, 2005) Bien que certaines études démontrent une corrélation entre un plus grand volume de débris ligneux grossiers et une plus forte abondance de musaraignes, rats et souris, beaucoup

d'incertitudes et de résultats incompatibles subsistent quand on analyse les effets sur les petits mammifères (Riffell et al., 2011). Par exemple, Fritts et al. (2017) suggèrent que les rongeurs ne seraient pas sensibles à la récolte, même grande, de biomasse forestière. Ceci est également appuyé par Homyack, Lucia-Simmons, Miller et Kalcounis-Rueppell (2014) qui concluent à la suite d'une étude effectuée en Caroline du Nord, aux États-Unis, qu'un retrait de 85 % de la biomasse forestière n'avait qu'une très légère influence sur la diversité et l'abondance des rongeurs. La littérature n'est pas encore assez exhaustive pour bien comprendre les impacts sur ceux-ci. Riffell et al. (2011) suggèrent d'ailleurs que la réponse des petits mammifères à la récolte de biomasse forestière serait dépendante du contexte dans lequel on se trouve. Ainsi, en fonction des caractéristiques physiographiques, de la densité des prédateurs et d'autres facteurs, plusieurs réactions pourraient être observables.

### **Amphibiens**

En ce qui a trait aux amphibiens, la science n'est pas non plus tout à fait claire sur les impacts probables. Le retrait des débris ligneux en forêt pourrait nuire à leurs besoins, notamment en matière de thermorégulation et de sites de nidification (Homyack, Aardweg, Gorman et Chalcraft, 2013). Les débris ligneux grossiers seraient également un atout pour les amphibiens, mais aussi plus largement pour l'herpétofaune, car ils permettraient la création de micro-habitats où la rétention de l'humidité serait meilleure, diminuant ainsi le risque de dessiccation chez ces organismes (Riffell et al., 2011). À ce sujet, la salamandre cendrée (*Plethodon cinereus*) est bon exemple d'espèce qui est particulièrement sensible à la modification du microclimat, à la diminution de l'humidité du sol et au déclin du couvert de protection (Roy, Nolet et Ltée, 2013). Une corrélation positive existerait entre le nombre de salamandres et la quantité de débris ligneux d'un milieu, lequel leur sert également à s'alimenter (Brooks, 1999; Butts et McComb, 2000). Certains auteurs affirment que les activités de récolte de la biomasse forestière n'induisent pas de répercussion sur ces organismes, et cela, même si de 80 % à 85 % des débris ligneux ont été retirés (Homyack et al., 2013; Fritts et al., 2016). À savoir que ces deux dernières études ont eu lieu dans le sud-est des États-Unis. Les impacts sur l'herpétofaune ne sont encore une fois pas uniformes dans la littérature scientifique. Selon MERN (2008), la récolte de la biomasse forestière peut provoquer une acidification des sols, ce qui aura un impact notamment sur des espèces d'amphibiens. En effet, c'est Wyman et Jancola (1992) qui a démontré que les sols acides dans les écosystèmes forestiers entraînent une diminution de la densité et de la richesse en espèces chez les amphibiens, lesquels seraient sensibles aux sols de faible pH. Autrement, il pourrait être suggéré que si la quantité de biomasse forestière au sol influence l'abondance et la richesse des insectes et autres invertébrés terrestres, des répercussions

pourraient être observées chez les amphibiens forestiers, tout comme chez les autres espèces qui se nourrissent également d'insectes (ex. oiseaux, petits mammifères) (P. Etcheverry, échange de courriel, 27 juin 2020).

Certaines études notent un impact significatif de la récolte de biomasse forestière sur les salamandres, particulièrement. Les résultats des études sont quelque peu confus. Dans certains cas, l'ajout de débris ligneux en forêt engendrait une baisse de la richesse des amphibiens et dans d'autres, quand on les retirait, les mêmes résultats étaient observés. En ajout, on s'aperçoit que le stade de décomposition de cette matière ligneuse pourrait jouer un rôle important dans leur abondance. Effectivement, les débris relativement jeunes leur seraient moins d'intérêt, tandis que ceux ayant plusieurs années d'existence, étant donc à un stade de décomposition plus avancé, seraient plus aptes à répondre aux besoins de ces espèces. Pour ainsi dire, si la récolte de débris à la suite d'une coupe compromettrait à long terme la génération de débris plus vieux, cela pourrait avoir des répercussions dommageables qui, à court terme, seraient potentiellement non visibles. (Riffell et al., 2011)

### **Invertébrés**

Au niveau des invertébrés, la récolte des débris grossiers et des chicots encore en place a un effet notable sur la biomasse de ces organismes, toutes espèces confondues. Ceci pourrait, à une certaine extension, expliquer en partie pourquoi les oiseaux sont autant affectés par la récolte de biomasse forestière, comme la quantité de proies d'invertébrés serait portée à diminuer dans un tel contexte. (Riffell et al., 2011) D'une autre façon, le retrait des chicots pourrait faire en sorte que les reptiles soient plus nombreux, en raison de la diminution des oiseaux qui s'en suivrait. D'ailleurs, Horn et Hanula (2008) ont démontré que lors d'un retrait de débris grossiers, l'abondance des arthropodes diminue. Les araignées, quant à elles, sont tributaires des débris ligneux en ce qui concerne leur quantité et leur type (Laigle, 2018). Cependant, il est possible d'observer un effet contraire chez les scarabées. En effet, une étude québécoise réalisée en forêt boréale a prouvé que l'abondance des scarabées était en hausse, peu importe les quantités de bois récoltées et laissées sur le sol forestier, et ce, seulement un an après les travaux (Work et al., 2013). Bref, les invertébrés, conjointement aux oiseaux et aux champignons, seraient les organismes vivants qui réagissent le plus négativement à la récolte de la biomasse forestière.

Évidemment, une des façons de limiter au mieux les impacts sur la biodiversité d'une telle pratique consiste à conserver une certaine quantité de biomasse forestière en forêt. Cependant, à ce jour, peu de recherches ont été faites sur les quantités et la disposition de bois mort devant être laissées en forêt dans l'optique de limiter ces impacts (Thiffault et al., 2015; Boué, 2018). De plus, les connaissances sur les débris



fins sont également très peu développées à l'heure actuelle, plus de recherches doivent être faites à ce niveau. Somme toute, à la lumière des connaissances actuelles qui sont bien entendu incomplètes, il n'est pas faux d'affirmer que la récolte de la biomasse forestière a des impacts évidents sur la biodiversité, spécialement sur les espèces saproxyliques. Il faut garder en tête qu'un écosystème forestier est un système complexe et dynamique dans lequel les êtres vivants interagissent continuellement et sont influencés par les facteurs abiotiques. C'est pourquoi il est difficile de parvenir à une compréhension des impacts à une échelle fine en prenant en compte l'ensemble des espèces et des individus ainsi que les interrelations qui les unissent.

### **5.1.2. Qualité de l'eau**

La récolte de la biomasse forestière aura différents impacts sur la qualité de l'eau. D'abord, la présence de débris ligneux de toutes tailles sur le sol forestier va faire en sorte de diminuer le ruissellement de surface, surtout dans les pentes fortes où la matière sera efficace pour stabiliser le sol. Cela aura pour effet de réduire l'érosion du sol minéral, puis le transport de sédiments et donc, ultimement, de limiter la charge sédimentaire dans les cours d'eau ou plans d'eau avoisinants. (Jia-bing, De-xin, Shi-jie, Mi et Chang-Jie, 2005; Elliot, 2010) Selon Buttle et Murray (2011), la teneur en humidité d'une parcelle exploitée serait peu modifiée, à part si le retrait de biomasse forestière occasionne l'érosion du sol.

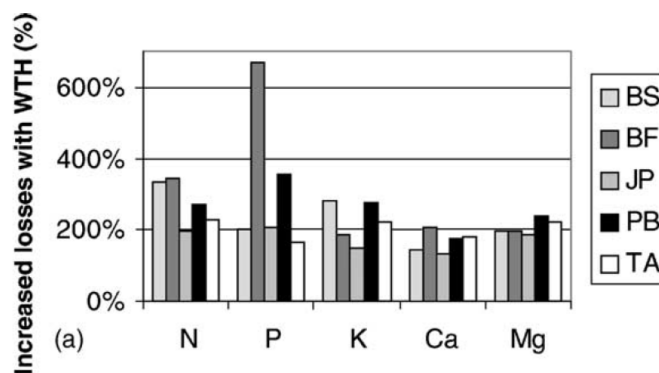
Ensuite, la sédimentation dans les cours d'eau est considérée comme un réel problème. En effet, elle peut affecter la qualité de l'eau, l'apport en nutriments dans les cours d'eau et les espèces aquatiques qui s'y trouvent. (Croke et Hairsine, 2006). Une présence accrue en sédiments dans les cours d'eau peut produire un envasement et une augmentation de la turbidité, engendrant une modification des propriétés physicochimiques de l'eau. Dans la zone euphotique d'un cours d'eau, qui correspond à une zone aquatique peu profonde où le rayonnement solaire est capable de pénétrer, la présence de particules sédimentaires en suspension, et en trop grandes quantités, va provoquer un réchauffement de la température de l'eau, car l'énergie solaire sera emmagasinée en plus grande quantité. De plus, les sédiments peuvent avoir des répercussions sur les macrophytes, les phytoplanctons et la solubilité de l'oxygène. En effet, en réchauffant, l'eau est moins saturée en oxygène, ce qui peut avoir un impact significatif sur les organismes aquatiques. (COVABAR, s. d.) D'un autre côté, la récolte de la biomasse forestière pourrait aider à régulariser le débit des cours d'eau. Effectivement, lors de la période hivernale, la biomasse laissée au sol retiendrait une plus grande accumulation de neige qu'en temps normal. Ces résidus accéléreraient également la fonte du couvert de neige le printemps venu, augmentant ainsi l'infiltration d'eau et le ruissellement. (Thiffault et al., 2015) Par conséquent, un des bienfaits de la récolte

est qu'elle empêcherait la désynchronisation du rythme de la fonte des neiges à l'intérieur d'un bassin versant puis entre les sites aménagés et non aménagés (Buttle et Murray, 2011).

Dans ces conditions, la récolte de la biomasse forestière pourrait avoir des impacts sur les aspects physicochimiques et biologiques de la ressource en eau. Au moment présent, peu nombreuses ont été les études qui se sont attardées aux impacts reliés à la récolte de la biomasse forestière. En revanche, on peut supposer que ceux-ci seraient similaires à ceux associés aux activités traditionnelles d'exploitation du bois rond.

### **5.1.3. Productivité du sol**

La productivité des sols forestiers est un enjeu qu'il ne faut pas négliger lorsque l'on veut exporter la biomasse hors de la forêt afin de la valoriser énergétiquement. Les effets sur le long terme d'une telle pratique pourraient être dommageables et compromettre la capacité du sol à soutenir la croissance des arbres au commencement de la deuxième révolution. Prendre des feuilles, des branches ou tout autre débris ligneux et les retirer à cette fin, c'est aussi retirer de l'écosystème forestier des éléments nutritifs nécessaires à la fertilité des sols. Les composants auxquels il est pertinent de s'intéresser dans l'optique du maintien de la productivité des sols sont la matière organique (MO) et les éléments nutritifs comme l'azote (N) et le phosphore (P), tout comme les cations basiques : potassium (K), calcium (Ca) et magnésium (Mg). (Thiffault et al., 2011) D'ailleurs, la récolte par arbres entiers aura pour effet d'enlever davantage de biomasse des forêts. Pour cette raison, elle pourrait avoir un impact plus grand sur le déséquilibre de ces éléments nutritifs que la récolte par troncs, qui, elle, va laisser plus de résidus sur le sol forestier lors des opérations d'ébranchage, de tronçonnage et d'écimage sur le parterre de coupe. (Ouimet et Duchesne, 2009; Laigle, 2018) La figure 5.2 démontre que la récolte par arbres entiers peut enlever d'un site de 150 % à 650 % plus de N, P, K, Ca ou Mg que la récolte par troncs. Selon Paré, Rochon et Brais (2002), la susceptibilité d'un sol à subir un appauvrissement nutritionnel variera en fonction du type de dépôt, de la composition du peuplement, mais aussi de sa densité, de son âge et de sa productivité ainsi que sa concentration en cations basiques (annexe 2). Les études ne démontrent pas d'effets clairs ou bien constants sur la fertilité du sol à la suite de l'exportation de biomasse, beaucoup de variabilité existe dans la littérature scientifique. Les études disponibles tendent davantage à étudier les impacts à court terme (ex. 20 ans). Cependant, une analyse de ces impacts à long terme devrait être faite, par exemple, à l'horizon d'une révolution d'un peuplement forestier ayant été récolté. Ceci permettrait de mieux cibler les catégories de sites et les peuplements où les effets sont plus sévères. (Thiffault, 2011; J. Laganière, conversation téléphonique, 19 juin 2020)



**Figure 5.2 Augmentation des pertes d'éléments nutritifs (%) occasionnée par la récolte par arbres entiers pour cinq espèces d'arbre : épinette noire (BS), sapin baumier (BF), pin gris (JP), bouleau à papier (PB), peuplier faux-tremble (TA) (tiré de : Paré, Rochon et Brais, 2002)**

### Cations basiques

La récolte de biomasse forestière aurait un impact sur la quantité de cations basiques qu'un sol peut retenir : un site exploité détiendrait moins de cations basiques qu'un site non perturbé. Une diminution des concentrations foliaires des arbres peut également être observée. (Thiffault et al., 2011) Les sols pauvres seraient d'ailleurs plus sensibles à ce type de récolte comme ils sont déjà faibles en Ca, Mg et K. (Thiffault et al. 2015) Ceci est également appuyé par Morris et al. (2019) qui mentionnent notamment que la récolte sur les sols pauvres peut davantage être problématique pour la nutrition des arbres. Aussi, la récolte par arbres entiers réduirait de façon plus importante la capacité d'échange cationique du sol (CEC), ce qui diminuerait ultimement la fertilité du sol. La CEC est fortement influencée par le pH du sol, mais peut être également affectée par la qualité et la quantité de la MO. (Thiffault, Paré, Bélanger, Munson et Marquis, 2006) À ce propos, la récolte par arbres entiers serait portée à acidifier davantage le sol par rapport au second procédé de récolte. En effet, les cations basiques qui sont transférés au sol lorsque les débris ligneux sont laissés à la surface du sol se décomposent et aident à neutraliser son acidification. (Röser et al., 2008; Oumouhou, 2012)

Lors d'une étude réalisée par Thiffault et al. (2006) en forêt boréale québécoise, plus spécifiquement en Gaspésie, en Haute-Mauricie puis dans la Forêt Montmorency et dans des peuplements forestiers différents (sapin baumier, épinette noire et peuplier faux-tremble) détenant des caractéristiques pédologiques également variables, les résultats ont pu mettre en lumière certains éléments intéressants au niveau des cations basiques 15 ou 20 ans après la récolte. D'abord, la récolte des débris ligneux aurait tendance diminuer les concentrations de Ca dans le sol, plus particulièrement lorsque la récolte par arbres

entiers est pratiquée. Les sols qui initialement ont une faible quantité de Ca limiteraient davantage la disponibilité de cet élément chimique pour les arbres subséquents, si une telle récolte était effectuée. Dès lors, une plus faible concentration de Ca pourrait être décelée dans les feuilles des arbres en régénération et de manière plus significative sur les sites où le matériel parental recèle moins de Ca. Ensuite, comme pour le Ca, une réduction des concentrations foliaires en Mg ont pu être observée. Celles-ci pourraient donc tirer profit du maintien de débris de bois sur le sol. Le cycle biogéochimique du Mg serait affecté par l'intensité de la récolte. Enfin, contrairement au Ca et au Mg, la récolte de biomasse forestière n'influence pas de manière significative le cycle du K. En effet, il a été démontré que la minéralisation de cet élément à partir des résidus de bois est par la suite peu utilisable par la régénération. La grande mobilité du K, un cation monovalent, contribue à son lessivage par les eaux de surface ou à son déplacement à travers les horizons du sol. D'ailleurs, selon une étude de Olsson, Bengtsson et Lundkvist (1996), les quantités de cations divalents (Ca et Mg) qui sont immobilisées dans le sol, par rétention cationique, en provenance de la décomposition du bois sont supérieures à 40 % pour le Mg et à 60 % pour le Ca, et ce, par rapport aux quantités de chaque élément initialement retrouvées dans le bois. Tandis que pour le K, ce n'est que de 0 % à 15 % de cet élément chimique qui est immobilisé dans le sol à travers le même processus. En outre, les résultats de Thiffault et al. (2011) démontrent d'ailleurs qu'une généralisation des impacts sur la fertilité du sol sur l'ensemble des sites de récolte n'est pas adéquate. Selon cette dernière étude, les principaux critères qui influencent la réponse d'un site à une récolte de biomasse forestière sont le climat et le microclimat, la granulométrie et la quantité de carbone organique du sol, les concentrations en cations basiques et en P dans le sol, puis l'autoécologie des espèces d'arbres.

Une étude ontarienne récente réalisée par Morris et al. (2019) a, quant à elle, démontré que sur les sols de texture grossière ou de forte granulométrie avec de faibles réserves en nutriments les résultats n'étaient pas significatifs 20 ans après l'exploitation par arbres entiers et celle par troncs seulement. Pourtant, ces conditions de sols sont habituellement perçues comme annonciatrices d'une certaine sensibilité à l'exportation de biomasse. L'étude suggère que, malgré ces résultats, le principe de précaution devrait être appliqué et que la récolte devrait éviter les sites à sols minces, faibles en éléments nutritifs et en C ainsi que les sols à texture grossière (ex. sols sablonneux).

Somme toute, les effets du type de récolte sur les réserves en nutriments ne peuvent pas être généralisés à toutes les situations et la sensibilité d'un site à une récolte intensive de biomasse sera très dépendante des conditions initiales de celui-ci. De plus, même si la récolte peut mener à une diminution des cations basiques dans le sol, il n'y a actuellement pas de preuve solide qui relie la déplétion de ces éléments

nutritifs avec une baisse de la croissance de la forêt. En revanche, un manque en cations basiques peut engendrer un déclin de la vigueur chez un arbre et ainsi le rendre plus sujet à être affecté par la sécheresse ou le froid. (Thiffault et al., 2011)

### **Matière organique**

La MO occupe un rôle important dans les sols, car elle contribue à améliorer la rétention de l'eau et des éléments nutritifs, la structure du sol (ex. stabilisation des agrégats) et à alimenter les microorganismes. (Osman, 2013) La MO est reconnue depuis longtemps comme un indicateur de fertilité (Johnson et Curtis, 2001; Osman, 2013). Les sols contribuent également au stockage d'une importante quantité de carbone; mécanisme essentiel à comprendre dans le contexte des changements climatiques (Johnson et Curtis, 2001). En effet, la réserve de C dans le sol serait approximativement deux fois plus élevée que celle de l'atmosphère (figure 2.1).

Au sein de la littérature scientifique, plusieurs études démontrent que l'intensité de la récolte de biomasse forestière aurait peu ou pas d'impact significatif à court terme sur le carbone du sol (Mattson et Swank, 1989; Olsson, Staaf, Lundkvist, Bengtsson et Kaj, 1996; Brandtberg et Olsson, 2012). Les résultats obtenus par Morris (2019) viennent appuyer les précédents auteurs en n'observant aucune différence significative dans les réserves de C à la suite de la récolte par arbres entiers et par troncs, lors de son étude réalisée en Ontario. Cependant, il a noté une diminution appréciable du C à la suite d'un traitement radical combinant la récolte par arbres entiers avec l'enlèvement de la couche supérieure du sol, l'humus, à 5 cm de profondeur. La diminution moyenne en carbone dans le sol pour les 14 sites de l'étude était de 50 %. De plus, les travaux de Thiffault et al. (2011), qui ont analysé 14 études distinctes, montrent qu'une partie d'entre elles obtiennent des résultats significatifs au niveau de la diminution du C du sol entre les différents types de traitements, plus particulièrement au niveau du sol organique. Cependant, d'autres études ne présentent pas de résultats révélateurs. Autrement, une publication récente de Mayer et al. (2020) démontre que la récolte des résidus de coupe a un effet globalement négatif sur le carbone du sol. La méthode de récolte par arbres entiers accentuerait d'ailleurs les pertes en C, et ce, de façon plus marquée dans les écosystèmes forestiers tropicaux que boréaux. Enfin, les sols les plus sensibles à la récolte de la matière organique seraient ceux qui sont initialement faibles en C organique et/ou qui possèdent une granulométrie grossière (Thiffault et al., 2006; Thiffault et al., 2011). Dans ces cas, l'apport en MO induit par les débris ligneux laissés sur le parterre de coupe à la suite d'une récolte serait bénéfique et même nécessaire. Dans l'éventualité où une telle pratique serait effectuée sur des sites sensibles, cela pourrait vivement altérer leur fertilité, leur productivité et leur capacité à séquestrer du C (Mayer et al., 2020).

## Azote

L'azote est le principal constituant de l'atmosphère terrestre, qui en contient au moins 78 %. Il est intégré au sol notamment par la fixation de l'azote atmosphérique ( $N_2$ ) et les dépositions atmosphériques ( $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$  et  $NO_x$ ) engendrées par les activités industrielles. (Zhang et al., 2005; Osman, 2013) De plus, cet élément fait partie de plusieurs macromolécules comme les acides aminés, les protéines, les acides nucléiques et les nucléoprotéines. La présence de N est un facteur limitatif majeur au niveau de la croissance des plantes, étant donné qu'il est peu biodisponible. C'est le processus de la minéralisation, rendu possible principalement par le travail des champignons et des bactéries, qui permet de convertir l'azote organique sous une forme inorganique utilisable par les plantes, soit en nitrates ( $NO_3^-$ ) ou en ions ammonium ( $NH_4^+$ ). Ceux-ci proviennent de la matière organique en décomposition. (Osman, 2013) En addition, il est maintenant connu que certaines plantes ont la capacité d'assimiler soit directement le N, soit indirectement à l'aide d'une relation symbiotique entre le système racinaire et les champignons mycorhiziens (Whiteside, Digman, Gratton et Treseder, 2012).

Similairement au C, l'effet de la récolte des débris ligneux sur la diminution des concentrations de N dans le sol ne serait pas relié significativement à l'intensité de la récolte (Huntington et Ryan, 1990; Brandtberg et Olsson, 2012). La revue de littérature de Thiffault et al. (2011) démontre qu'il existe beaucoup de variabilité au sein des études. Il est donc difficile de tracer une tendance claire, mais celle-ci note une légère diminution des concentrations à la suite d'une récolte par arbres entiers. Dans Brais, Paré, Camiré, Rochon et Vasseur (2002), ce sont les concentrations de N des horizons de sol organiques qui étaient les plus affectées par la récolte par arbres entiers : les résultats pour les horizons minéraux sont peu significatifs. Cette particularité serait vraie pour le N, mais aussi dans les cas du C, du P et des cations basiques. (Thiffault et al., 2011) Morris (2019) est arrivé au constat que pour le N, selon l'un ou l'autre des deux types de récoltes principaux, les résultats étaient non-significatifs. La récolte de biomasse forestière soulève quand même des questionnements en ce qui a trait à la perturbation du cycle de l'azote entre le sol et la végétation. Ultimement, il serait possible que l'exportation de l'azote organique hors des sites de récolte engendre une diminution de l'azote inorganique dans le sol et, par conséquent, nuise à la nutrition des arbres. (Thiffault et al., 2011)

## Phosphore

Comme le N, le phosphore (P) est élément indispensable à la vie étant donné qu'il fait partie des acides nucléiques; il est aussi limitatif à la croissance des plantes. Le P n'a pas de réserve dans l'atmosphère comme les autres éléments (N et C), il provient de l'altération des phosphates de calcium des roches

mères, particulièrement de l'apatite. Malgré sa grande abondance dans les sols, peu de P est biodisponible pour les organismes vivants. Le P assimilable par les plantes sera ensuite transféré aux animaux par l'alimentation. Il retournera au sol lors de la mort des organismes via la décomposition. Il sera ensuite minéralisé et de nouveau disponible pour les plantes. (Bourque, 2010c; Osman, 2013)

Contrairement au C et au N, les concentrations de P disponible semblent être plus susceptibles d'être affectées de manière importante par les activités de récolte (Röser et al., 2008). En forêt boréale, dans un peuplement forestier composé de sapin baumier (*Abies balsamea*), la méthode par arbres entiers a pu augmenter les pertes en P jusqu'à 650 % (Paré, Rochon et Brais, 2002). Morris (2019) a observé que les concentrations étaient significativement diminuées lors d'une récolte par arbres entiers et par troncs seulement, et ce, 20 ans après l'extraction de la matière. La réponse dans le sol minéral était particulièrement importante, les niveaux de P étaient environ 50 % plus bas que les niveaux avant la récolte. Cependant, de manière générale, les sols en forêts boréales et tempérées soumis à la récolte seraient supposément moins sensibles à l'exportation de matière ligneuse, en raison de leur formation issue des dépôts glacio-lacustres riches en phosphores (Thiffault et al., 2011).

Somme toute, certains cas probants démontrent de fortes exportations de phosphore hors des sites de récolte, ce qui peut nous informer que certaines précautions sont à prendre lors d'une telle pratique. Généralement, beaucoup de variabilité existe dans les résultats des différentes études analysées, notamment en ce qui concerne les impacts d'une récolte de biomasse forestière sur la matière organique, l'azote, le phosphore et les cations basiques (K, Ca et Mg). Malgré cela, il est possible de déceler que les concentrations de P, de Ca et Mg sont les plus susceptibles d'être affectées. Enfin, il n'y a pas d'impacts constants à l'ensemble des peuplements forestiers et des sols.

#### **5.1.4. Productivité du peuplement**

Comme la récolte de la biomasse forestière peut avoir un impact sur la fertilité des sols, il importe de se questionner si la productivité du peuplement peut être à son tour affectée par cette pratique. D'abord, il est à savoir que celle-ci va notamment dépendre du microclimat, de la disponibilité des éléments nutritifs et de l'eau ainsi que de la végétation. Comme la présence de résidus ligneux au sol peut modifier les caractéristiques d'un site en lien avec ces éléments, il est suggéré qu'un retrait de biomasse forestière peut produire une diminution de la productivité. En addition, en regard de la croissance des arbres, cette dernière va surtout être influencée par les conditions de site, c'est-à-dire en fonction des conditions climatiques régionales (macroclimat), de la topographie et du type de sol (ex. argileux, limoneux ou

sableux). Étant donné que ces conditions sont changeantes au cours d'une révolution, l'aspect temporel est également important. (Thiffault et al., 2011) Il faut aussi considérer la composition des peuplements forestiers, car certaines espèces seront moins affectées que d'autres par l'intensité de la récolte au niveau, entre autres, de leur nutrition foliaire et de leur croissance (Paré, Rochon et Brais, 2002). Par exemple, l'épinette noire s'adapterait mieux que le pin gris et le peuplier faux-tremble à une baisse des réserves d'éléments nutritifs. Ainsi, ces multiples combinaisons de facteurs font en sorte que les études visant à comprendre les effets sur la croissance des arbres et la productivité de la forêt obtiennent des résultats variables. (Thiffault et al., 2011; Thiffault et al., 2015)

Ensuite, il est possible d'observer autant des effets positifs que négatifs sur la croissance des arbres et la productivité du peuplement à la suite d'un retrait de biomasse forestière. Par exemple, certains résultats significatifs suggèrent que la survie des semis serait plus grande pour certaines espèces lorsque la quantité de résidus de bois est faible. Dans ces conditions, la récolte par arbres entiers peut leur être bénéfique. Avec ce type de récolte, la croissance des semis serait aussi meilleure, car le sol minéral et le sol organique seraient davantage perturbés et mélangés durant les opérations. (Morris et Miller, 1994) Cependant, elle exposerait davantage les semis au gel et au vent en diminuant la quantité de débris ligneux au sol. Le diamètre des semis peut aussi être affecté; il diminuerait avec cette pratique. Dans un autre ordre d'idées, le fait de récolter par arbres entiers créerait de meilleures conditions de reboisement et favoriserait également la régénération naturelle. (Flemming et al., 2006) Moins de débris ligneux sur le sol forestier prolongerait même la période de croissance des arbres en permettant aux radiations solaires d'atteindre plus directement le sol et de le réchauffer plus tôt en début de saison. (Proe et Dutch, 1994) Ceci serait particulièrement vrai en forêt boréale où l'on peut observer un effet positif sur la hauteur des arbres (Thiffault, 2011). En contrepartie, le maintien d'une certaine quantité de débris ligneux au sol peut servir à diminuer la température du sol, pour ensuite favoriser la conservation de l'humidité en réduisant les pertes par évaporation et évapotranspiration. Ainsi, ce seraient les sols des sites plus secs et moins productifs où la MO serait initialement plutôt faible qui en bénéficieraient davantage. (Roberts, Harrington et Terry, 2005) Selon Thiffault et al. (2011), dans les années suivant une coupe, la disponibilité des éléments nutritifs aurait peu d'impact sur la productivité du peuplement et la croissance des arbres. À court terme, ce serait davantage le microclimat et la végétation compétitrice qui auraient une influence. Cependant, à plus long terme, lorsque le couvert forestier se referme, la disponibilité des éléments nutritifs s'avère être un facteur d'importance, mais aussi limitatif. En effet, à l'approche de ce stade, les arbres auraient des exigences plus élevées en matière de disponibilité des éléments nutritifs.



Globalement, la fertilité des sols pourrait donc jouer un rôle non négligeable dans la productivité des peuplements à l'échelle d'une révolution. Ce constat est aussi fait par Proe et al. (1994). De plus, en ce qui a trait à la croissance en hauteur des peuplements en forêt boréale, celle-ci n'est pas affectée de manière uniforme à la suite d'une récolte par arbres entiers. En revanche, il semble qu'après une période d'environ 15 ou 20 ans ce type de récolte affecte la croissance en hauteur. (Thiffault et al., 2011; Morris, 2019) Dans l'étude de Walmsley, Jones, Reynolds, Price et Healey (2009) réalisée dans des peuplements d'épinettes de Sitka (*Picea sitchensis*), la récolte par arbres entiers a conduit à une réduction du diamètre hauteur de poitrine (DHP) (10,3 %), de la hauteur des arbres (8,2 %) et de la surface terrière (15,3 %) lors de la deuxième rotation. Les auteurs avancent que ces observations seraient dues aux plus grandes quantités de N, de P et de K exportées avec la récolte par arbres entiers. D'ailleurs, en plus d'observer que la biomasse des peuplements ayant subi ce type de récolte était moindre que dans ceux où la récolte par troncs a été pratiquée, Proe et Dutch (1994) ont aussi noté une baisse des macro-éléments (N, P et K) dans les arbres des sites récoltés plus intensivement. Dans la revue de littérature de Thiffault et al. (2011), ce sont principalement les déficiences en N qui étaient associées à une diminution de la croissance des arbres.

#### **5.1.5. Gestion des résidus**

Si on aborde l'utilisation de la biomasse forestière pour la production d'énergie dans une perspective de cycle de vie, il va de soi de considérer l'enjeu de la gestion des résidus. On peut faire référence à cette étape comme étant la gestion en fin de vie du produit énergétique. Celle-ci est nécessaire et inévitable, car la combustion de la biomasse forestière va évidemment générer des cendres de bois (cendres résiduelles et cendres volantes) (MFFP, 2006). Avec la croissance de la bioénergie au Canada, la quantité de cendres à gérer est appelée à s'accroître (Hannam et al., 2018). Pour tendre vers une gestion qui s'insère dans un cadre de développement durable, il importe de trouver et de diversifier les voies de valorisation de ces résidus. L'enfouissement des cendres, bien répandu dans plusieurs provinces canadiennes, ne représente pas une façon durable de s'en départir (Lamers et al., 2018).

La teneur en cendres de la biomasse forestière, qui correspond au poids des cendres par rapport au poids total du combustible sec, va généralement varier entre 0,5 % et 5 % (MFFP, 2006; Majeau, Hébert, Desforges, 2013). Cette variation est causée par le type de bois utilisé. Par exemple, l'écorce peut générer sept fois plus de cendres que le bois (cambium, aubier, duramen, moelle). Il est possible d'estimer que, de manière générale, la biomasse forestière résiduelle récupérée des forêts ait une teneur moyenne en cendres d'environ 5 %. Ainsi, pour chaque tonne de biomasse qui alimentera un système de combustion,

50kg de cendres devront être gérés par la suite. (MFFP, 2006) À grande échelle, cela peut créer de grandes quantités de résidus, surtout dans le contexte où cette filière grandit.

Considérer les cendres de bois comme un déchet ultime est inexact. Effectivement, les cendres sont riches en nutriments. Elles contiennent du phosphore, du calcium, du magnésium, du potassium ainsi que du silicium (Si), de l'aluminium (Al) et du fer (Fe). Elles ne contiennent cependant pas d'azote étant donné qu'il s'évapore avec le gaz lors de la combustion. (Röser et al., 2008; Van Loo et Koppejan, 2008). Dans ces conditions, il est possible d'utiliser ces résidus pour changer les propriétés chimiques d'un sol, car elles peuvent être utilisées pour la fertilisation et le chaulage. Elles sont donc intéressantes pour le secteur agricole et peuvent même diminuer les émissions de GES associées à l'utilisation d'engrais chimiques. Historiquement, les cendres ont été beaucoup utilisées pour fertiliser et amender les sols au Québec. Cependant, à partir de 1930, l'exploitation des gisements de calcaire et de muriate de potassium a conduit à la diminution de l'utilisation des résidus de combustion. Ce n'est qu'à partir des années 1980 et 1990, à la suite de la hausse des coûts pour l'enfouissement et de l'arrêt des subventions gouvernementales pour l'utilisation agricole de la chaux, que les cendres de bois ont de nouveau suscité l'attention. En 2006, le Québec générait 300 000 tonnes métriques (base humide) de cendres dont un peu plus de la moitié (54 %) a été principalement recyclé dans le secteur agricole. Quant aux cendres non valorisées, elles ont été en grande majorité enfouies dans les LET. Les régions qui se démarquaient à l'époque, en regard des quantités générées, étaient le Saguenay-Lac-Saint-Jean, l'Outaouais et l'Abitibi-Témiscamingue (annexe 3). (Hébert et Breton, 2009) En 2015, le secteur agricole était encore le plus grand consommateur de cendres de bois comme le démontre le tableau 5.1.

**Tableau 5.1 Quantité totale de cendres de bois utilisée comme amendement de sol pour l'agriculture, la foresterie et la remise en état de sites au Québec** (inspiré de : Hannam et al., 2016)

Activité	Agriculture	Foresterie	Remise en état de sites	Total
Quantité	51 387	12 817	14 272	78 476

Les résidus de combustion peuvent aussi être utilisés dans un contexte forestier et contribuer au retour de certains nutriments en forêt, par le biais de l'épandage, afin de compenser les déficits créés par la récolte. Leur utilisation est d'ailleurs encadrée par la *Loi sur l'aménagement durable des forêts* et la *Loi sur la qualité de l'environnement* (LQE), tout comme par des normes commerciales (BNQ) (Hannam, Deschamps, Kwiaton, Venier et Hazlett, 2016). L'épandage de cendres aurait des effets similaires à ceux occasionnés par un feu de forêt, en ce qui concerne notamment le pH du sol minéral et la disponibilité des cations basiques (Hannam, Fleming, Venier et Hazlett, 2019). Ainsi, ceci aurait pour effet d'améliorer la

fertilité des sols où le N n'est pas déficitaire. Pour les sites riches en N, les cendres de bois pourraient même avoir un effet bénéfique sur la productivité du peuplement et la nutrition foliaire (Huotari, Tillman-Sutela, Moilanen et Laiho, 2015). De plus, les cendres peuvent contribuer à l'augmentation du pH du sol forestier et peuvent donc prévenir l'acidification du sol en lien avec l'exportation de la matière ligneuse hors des sites de coupe ainsi que les dépôts atmosphériques secs (ex. poussières et gaz) et humides (ex. pluie et neige). Cette pratique n'est cependant pas très répandue dans les forêts canadiennes. À l'heure actuelle, plusieurs chercheurs, par exemple ceux du réseau AshNet, étudient les effets de l'épandage de cendres de bois en forêt sur les propriétés physico-chimiques des sols, la biodiversité végétale et des sols, la productivité de la forêt et la qualité de l'eau. (Hannam et al., 2016) Ces expériences sont également nécessaires afin de mieux comprendre ce qu'implique une telle pratique, et ce, dans diverses conditions pédologiques et de peuplement forestier. À ce sujet, davantage de recherches doivent être faites sur les effets à long terme. En outre, une attention particulière doit être apportée sur l'identification des meilleures pratiques d'entreposage, de traitement et d'application des cendres, ainsi que sur la qualité des cendres utilisées, qui, elle, peut être très variable, pour ne nommer que celles-ci. (Emilson et al., 2018) Sur ce dernier élément, certaines préoccupations existent quant à la contamination des écosystèmes forestiers avec des éléments-traces métalliques (ETM) qui se retrouveraient dans les cendres des chaudières. (Hannam et al., 2018)

#### **5.1.6. Atténuation des changements climatiques**

Les bénéfices en termes de réduction des émissions de GES qu'il est possible d'obtenir avec l'utilisation de la biomasse forestière comme source d'énergie sont, avec l'aspect renouvelable de cette ressource, à la base de l'intérêt pour le développement de cette filière. Comme les chapitres 2 et 3 du présent essai ont couvert une grande partie des notions devant être abordées ici pour couvrir l'enjeu de l'atténuation des changements climatiques, nous nous contenterons de revenir sur les principaux constats faits dans ceux-ci. À cela s'ajoutera un nouvel aspect qui n'a pas été encore traité et qui concerne les émissions de CO<sub>2</sub> pendant les différentes étapes du cycle de vie de la biomasse forestière.

Les constats faits dans les chapitres antérieurs démontrent que les bénéfices GES peuvent être nettement variables en fonction :

- du type de biomasse forestière;
- de la technologie de valorisation;
- du scénario de référence (ex. combustible remplacé).

D'abord, le type de biomasse forestière utilisé dans un projet de bioénergie va avoir une influence sur la temporalité des émissions de carbone, ce qui reportera à court, moyen ou long terme le gain environnemental. En raison de la dette carbone, la combustion du bois ne peut pas être automatiquement considérée comme carboneutre. Dans ces conditions, il faut privilégier les types de biomasse forestière auxquels est associée la plus petite dette de carbone. En faisant cela, les bénéfices GES tirés d'un projet énergétique vont être beaucoup plus rapides. Ensuite, l'énergie utile obtenue à partir de la biomasse forestière variera en fonction de la technologie de conversion utilisée. Sur le plan environnemental, il est évidemment bien plus avantageux d'utiliser une technologie avec un haut rendement énergétique. Par exemple, le facteur d'émission de la biomasse (112 000 kg CO<sub>2</sub>/TJ) peut être significativement plus élevé avec une efficacité de conversion énergétique de 50 % ( $112\,000/0,50=224\,000$  kg CO<sub>2</sub>/TJ) par rapport à une efficacité de 80 % ( $112\,000/0,80=140\,000$  kg CO<sub>2</sub>/TJ).

Enfin, selon le scénario de référence, donc le type de combustible remplacé par la biomasse forestière, les bénéfices GES ne seront pas les mêmes. En effet, comme nous l'avons vu dans la section 3.3 du chapitre 3, chaque combustible possède son propre facteur d'émission de CO<sub>2</sub>. En conséquence, si le scénario de référence comprend le remplacement d'un combustible comme le mazout lourd (74 100 kg CO<sub>2</sub>/TJ), la réduction des émissions des GES sera plus grande que si le combustible était plutôt du gaz naturel (56 100 kg CO<sub>2</sub>/TJ). Ainsi, les combustibles détenant les facteurs d'émissions les plus élevés devraient être priorités par les projets de conversion à la biomasse.

Les émissions de carbone relevées à la sortie de la cheminée d'une unité de combustion de bois représentent une grande partie des émissions relatives à la valorisation énergétique de la biomasse forestière. Toutefois, celles-ci ne représentent pas la totalité des émissions engendrées par l'ensemble des activités ayant lieu en amont et qui permettent cette finalité. L'ensemble des étapes qui précèdent la combustion, auxquelles on peut faire référence en utilisant le terme chaîne de valorisation, émettent également du CO<sub>2</sub> et celles-ci sont indissociables de l'énergie produite en fin de compte. On parle ici des activités reliées à la récolte, au transport, à l'entreposage, au conditionnement et à la disposition des résidus, auxquelles est liée l'utilisation de combustibles fossiles.

La chaîne d'approvisionnement doit être optimisée afin de minimiser ses émissions de CO<sub>2</sub>. Cette optimisation passe notamment par le transport de la ressource en circuits courts pour Vision Biomasse Québec (2015b), dans l'objectif de limiter les déplacements sur de longues distances. Surtout que de prime abord, le bois est une ressource très peu dense en énergie. Ainsi, en considérant uniquement l'aspect du transport, pour chaque kilomètre parcouru par camion, et pour une quantité d'énergie potentielle

équivalente, la biomasse forestière émettra plus de carbone que le transport des énergies fossiles, d'où l'intérêt d'un approvisionnement local en combustible. Berndes et al. (2016) estime que l'énergie fossile associée aux activités de récolte, de fragmentation du bois et de transport est équivalente à moins de 5 % de l'énergie contenue dans la biomasse forestière. Pour leur part, après avoir analysé les résultats de 22 ACV différentes, Klein, Wolf, Schulz et Weber-Blaschke (2015) estiment que les émissions de la chaîne d'approvisionnement, en équivalent CO<sub>2</sub>, se situeraient entre 6,3 et 67,1 kg/m<sup>3</sup>. En estimant que chaque m<sup>3</sup> de biomasse forestière séquestre en moyenne 734 kg éq. CO<sub>2</sub>, les émissions associées à l'acheminement de la matière - du site de récolte à une chaufferie ou un client quelconque - représenteraient de 0,8 % à 9 % du carbone total contenu dans la matière ligneuse. De cette manière, c'est 90 kg de carbone qui est émis dans l'atmosphère pour chaque tonne de carbone séquestré dans le bois qui est livré à une chaufferie, par exemple, selon le scénario le plus pessimiste. (Klein et al. 2015) Ainsi, les émissions de CO<sub>2</sub> de la chaîne d'approvisionnement se trouvent à être plutôt faibles par rapport aux émissions totales. Cela ne diminue pas pour autant l'impact qu'elles peuvent avoir sur le potentiel de réduction des émissions de GES de la filière. À savoir que la chaîne d'approvisionnement des énergies fossiles est bien plus émettrice de GES que celle de la biomasse forestière (Bernier et al., 2012).

## **5.2. Les enjeux sociaux**

Comme les enjeux sociaux sont également au centre de la notion de développement durable, ceux-ci seront abordés. Les principaux enjeux de société relatifs à l'utilisation de la biomasse forestière à des fins de bioénergies sont l'acceptabilité sociale vis-à-vis de la filière et des projets de conversion énergétique, la santé des populations par l'entremise de la qualité de l'air, l'indépendance ainsi que la sécurité énergétique du Québec, puis la participation des communautés autochtones.

### **5.2.1. Acceptabilité sociale**

Il est maintenant reconnu que l'acceptabilité sociale est un aspect immanquable au sein de tout grand projet. Plusieurs projets énergétiques ont d'ailleurs rencontré certains problèmes à ce niveau, comme les parcs éoliens, les ouvrages hydrauliques et l'exploitation du gaz de schiste, pour ne nommer que ceux-ci. (Fortin et Fournis, 2014) À défaut de prendre en compte cet aspect, il peut y avoir des répercussions, notamment sur la réputation de l'initiateur, mais aussi sur le succès du projet en tant que tel et sur le développement économique. Autant les promoteurs que le gouvernement en sont maintenant conscients. (CPEQ, 2012) Au cours des dernières années, l'acceptabilité sociale a été définie de différentes façons par les chercheurs. L'existence de plusieurs définitions dans la littérature scientifique traduit la récente

émergence de cette notion. D'ailleurs, les travaux de Batellier (2015) ont permis d'identifier 13 définitions formelles de ce concept. Pour Gendron (2014), l'acceptabilité sociale correspond à l'« assentiment de la population à un projet ou à une décision résultant du jugement collectif que ce projet ou cette décision est supérieur aux alternatives connues, y compris le statu quo. » Ce n'est donc pas un jugement au niveau de l'individu à l'égard d'un projet, mais d'abord et bien avant tout à l'échelle collective. Elle consiste à rassembler les parties prenantes afin d'atteindre le consensus sur un projet, l'atteinte de l'unanimité chez elles n'étant pas réaliste.

Le développement de la filière du bois-énergie au Québec ne doit pas avoir lieu en faisant fi de cet enjeu. Il doit être envisagé tant à une échelle globale que locale dans le milieu où un projet s'implante. En effet, une distinction est à faire entre l'acceptabilité sociale des Québécois envers cette façon de produire de l'énergie et l'acceptabilité sociale des communautés à proximité. On fait souvent référence à l'expression "NIMBY" (Not In My Back Yard) pour désigner la résistance locale envers l'implantation de certains projets. D'ailleurs, le niveau d'acceptabilité sociale de tels projets est souvent plus bas au sein des communautés qui les accueillent dans leur milieu de vie. (Paletto, Bernardi, Pieratti, Teston et Romagnoli, 2019) À ce jour, l'acceptabilité sociale de l'utilisation de la biomasse forestière comme source d'énergie au Québec n'a pas encore fait l'objet d'une enquête exhaustive ayant pour but d'évaluer concrètement le niveau d'acceptabilité de la population vis-à-vis l'exploitation et la valorisation de cette ressource. Ainsi, et contrairement à l'énergie éolienne qui a récemment suscité beaucoup plus d'attention, il est plus difficile de dépeindre l'opinion de la population concernée à propos de la biomasse forestière. Toutefois, l'acceptabilité sociale des projets à la biomasse forestière au Québec est généralement bonne. D'ailleurs, elle serait particulièrement bonne en région (Abitibi-Témiscamingue, Bas-St-Laurent, Chaudière-Appalaches, Saguenay-Lac-St-Jean, Gaspésie-Iles-de-la-Madeleine). (FQCF, 2013; J-P. Bourque, conversation téléphonique, 13 juin 2020) Et cela, sans doute en raison de la relation plus étroite qu'ont ces populations avec le secteur forestier. En contrepartie, l'acceptabilité sociale serait à son plus faible dans les régions administratives suivantes : Laval, Montérégie, Lanaudière, Capitale-Nationale, Laurentides et Outaouais. On peut donc dire qu'en région urbaine la biomasse forestière est moins bien acceptée socialement.

Les travaux de Morency (2011) ont pu prendre le pouls de la situation à la suite de rencontres avec différents acteurs du milieu. Son constat est que chez certains, la production de bioénergie à partir de matière ligneuse a une connotation positive, alors que chez d'autres, des préoccupations persistent et nuisent à la perception de la ressource, en grande partie pour des raisons de nature environnementale.

En effet, les préoccupations concernent les impacts de la récolte de la matière en forêt (productivité des sols, productivité de la forêt, biodiversité, etc.), mais aussi tout ce qui englobe l'impact de la production d'énergie elle-même, par exemple lors de la combustion. À cet égard, c'est la question de la qualité de l'air (ex. émissions de polluants et particules fines) qui est principalement soulevée. De ce fait, les changements récents au niveau de la réglementation des appareils de chauffage au bois dans certaines villes du Québec (ex. Montréal) ont pu contribuer à donner une mauvaise image à la combustion de la biomasse forestière, même si l'on parle de technologies totalement différentes (J-P. Bourque, conversation téléphonique, 13 juin 2020). En effet, chez certaines personnes persiste une impression que les technologies utilisées pour la combustion du bois sont semblables au poêle à bois traditionnel largement répandu dans le secteur résidentiel (Morency, 2011). Cependant, les technologies de combustion de la biomasse forestière sont bien différentes, notamment en ce qui a trait à leur plus grande efficacité de conversion énergétique et à leurs plus faibles émissions de polluants (ADEME, 2007; MFFP, 2011). En ajout, les installations nécessaires à la production de chaleur à partir de biomasse sont souvent perçues comme complexes, par exemple, au moment de l'installation d'une chaudière. Ces installations de chauffage à la biomasse s'avéreront donc des changements plus compliqués à mettre en place selon la perception de plusieurs. Cette idée est d'ailleurs renforcée par l'impression que le chauffage à l'électricité, au mazout ou bien au gaz naturel serait plus convivial. (Morency, 2011) Une grande part des perceptions négatives est donc due à un manque de connaissances par rapport à la filière de la biomasse et aux technologies utilisées, qui, en réalité, sont assez performantes (Vision Biomasse Québec, 2015a). Le MFFP (2006) ajoute également que la population peut avoir certaines craintes quant aux émissions de polluants lorsqu'un projet utilise des résidus CRD pour alimenter sa chaudière et au dérangement occasionné par le va-et-vient des camions de livraison de combustible. À d'autres moments, la filière a eu mauvaise presse et cela a eu des répercussions sur l'opinion publique. En effet, un rapport de Greenpeace publié en 2011 et intitulé « Biomasse ou biomascarade » a eu un grand impact sur les perceptions populaires vis-à-vis de la biomasse forestière. Ce rapport, peu nuancé et pas tout à fait juste sur bien des points, avait engendré une polémique. (Réseau d'expertise et de valorisation en biomasse forestière, 2013)

D'un autre côté, ceux qui sont plus réceptifs à l'utilisation de la biomasse forestière soulignent les bénéfices environnementaux encourus notamment par la substitution des énergies fossiles fortement émettrices de GES, surtout dans un contexte climatique où la diminution de nos émissions est un passage obligé. (Morency, 2011) Sans oublier que la filière peut être bien perçue pour sa capacité à stimuler les communautés locales, par exemple au niveau de la création d'emplois (J-P. Bourque, conversation téléphonique, 13 juin 2020). Afin de s'assurer d'une bonne acceptabilité sociale, il est important de

considérer l'ensemble des enjeux relatifs à la ressource et aussi, de favoriser son développement en considération des meilleures pratiques connues. Il faut également que les promoteurs des projets agissent de façon à encourager l'accueil favorable de la filière énergétique au sein des communautés. Ceci peut se traduire par une bonne communication de l'information relative au projet à la population concernée, puis également par une démarche de consultation adéquate auprès des intéressés. (FQCF, 2013)

À la suite de la demande de la Fédération québécoise des coopératives forestières (FQCF), le Regroupement national des conseils régionaux de l'environnement du Québec (RNCREQ) a identifié les critères et les conditions gagnantes pour obtenir l'acceptabilité sociale et environnementale de la population en ce qui a trait à la filière de la biomasse forestière pour la production de chaleur. Ainsi, après consultations avec différents groupes d'intérêt (ex. Équiterre, Service Canadien des forêts, Réseau d'expertise et de valorisation biomasse forestière), les cinq critères répertoriés par le RNCREQ sont :

1. Démontrer qu'on utilise la bonne matière (ex. type de biomasse forestière engendrant la plus petite dette de carbone);
2. Adopter des pratiques exemplaires (ex. considérer la biodiversité puis la capacité de régénération des sols lors de la récolte et favoriser les circuits courts);
3. Ne pas déplacer le problème (ex. respect des normes d'émissions);
4. Produire efficacement et favoriser le meilleur usage de l'énergie (ex. favoriser l'efficacité énergétique et la substitution des énergies fossiles les plus émettrices);
5. Autres conditions gagnantes (ex. s'assurer que la matière première est de bonne qualité, s'assurer que l'implantation des projets se fait dans un contexte favorable à leur succès et s'assurer d'optimiser énergétiquement, environnementalement et socialement la ressource.) (RNCREQ, 2013)

### **5.2.2. Santé des populations et qualité de l'air**

La combustion de la biomasse forestière pour la production d'énergie fait émerger des préoccupations quant à l'impact de ces activités sur la qualité de l'air. Cette pratique de valorisation énergétique engendre des émissions atmosphériques de polluants pouvant par la suite porter atteinte à la santé humaine, notamment par l'entremise de la formation de smog. Parmi les principaux polluants répertoriés et posant un certain risque pour la santé des communautés, on répertorie les particules fines, surtout celles d'une taille inférieure à 2,5  $\mu\text{m}$  (PM 2,5), et des polluants tels que le monoxyde de carbone (CO), les



hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les composés organiques volatils (COV), les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) et les dioxines. (Petrov, 2012; Jacobson et Ciolkosz, 2013; Nature Québec, 2014b) Les impacts de ces polluants sur la santé humaine sont connus. (MELCC, s. d.; Petrov, 2012) Évidemment, comme le bois, les autres types de combustibles (ex. charbon, mazout lourd, mazout léger et gaz naturel) ont eux aussi un impact sur la qualité de l'air. Il est cependant ardu d'offrir un comparatif convenable entre ces différents combustibles concernant leurs émissions de polluants par unité d'énergie. Cependant, on peut s'attendre à ce qu'une chaudière technologique bien opérée et utilisant le bon combustible ait un impact minimal sur la qualité de l'air. Il est tout aussi délicat d'avancer que les émissions de polluants sont les mêmes pour chaque unité de combustion fonctionnant à la biomasse forestière et même que les émissions d'une unité spécifique seront constantes dans le temps. Effectivement, selon Jacobson et Ciolkosz (2013), beaucoup de facteurs sont à prendre en compte lors de la combustion de la biomasse forestière pour estimer la quantité de rejet de polluants dans l'atmosphère. Ces derniers ont identifié cinq facteurs principaux :

1. Le type de bois;
2. Le taux d'humidité de la matière;
3. La technologie utilisée lors de la combustion;
4. Les caractéristiques de fonctionnement de l'unité de combustion;
5. Le type de technologie d'épuration des gaz de combustion.

Plusieurs raisons expliquent l'influence de ces facteurs. Premièrement, le type de bois utilisé, notamment sa grosseur, va influencer les émissions de CO, de fines particules et de HAP. Plus gros sont les morceaux de bois mis dans le système de chauffage, moins complète et rapide sera la combustion. C'est lorsque la combustion n'est pas optimale que davantage de polluants sont émis. Deuxièmement, un taux d'humidité élevé dans la biomasse engendre des conditions de combustion moins favorables. Trop d'humidité dans la chambre de combustion occasionnera une diminution de la température, menant à une combustion incomplète avec les mêmes répercussions qu'au point précédent. Troisièmement, une meilleure efficacité de combustion limitera les émissions de polluants, c'est pourquoi le choix de la technologie utilisée est influent. Quatrièmement, les caractéristiques de fonctionnement de l'unité de combustion (température, temps et turbulence) vont aussi avoir un impact sur les émissions. Cinquièmement, la technologie utilisée pour l'épuration des gaz de combustion va nécessairement avoir une conséquence sur les émissions de polluants. (Jacobson et Ciolkosz, 2013) Plusieurs technologies existent pour diminuer les particules en

suspension dans les rejets, par exemple : dépoussiéreur multicyclone, filtre à manches, laveur de gaz et précipitateur électrostatique. L'efficacité de chacune de ces technologies est variable. (MFFP, 2011; Jacobson et Ciolkosz, 2013) Le choix de l'une ou l'autre de ces technologies va dépendre d'abord du type de combustible et ensuite de la puissance de la chaudière (Nature Québec, 2014b). Dans une situation où seraient employés des granulés de qualité aux caractéristiques homogènes dans une chaudière moderne, les émissions de particules pourraient être jusqu'à 80 % plus basses que dans une chaudière d'une technologie moins avancée. La combustion complète qui est possible avec les technologies plus actuelles permet d'abaisser considérablement les polluants émis. (Petrov, 2012) D'ailleurs, au Québec, c'est le *Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère* (RAA) – qui, avant sa refonte, était connu sous le nom de *Règlement sur la qualité de l'atmosphère* (RQA) - qui régit les normes d'émissions et les appareils de combustion eux-mêmes. Les technologies d'épuration des gaz de combustion s'avèrent une option obligée afin de rendre les installations de combustion conformes aux limites d'émissions de particules du RAA. Tout compte fait, il est admis qu'en fonction de l'agencement de certains paramètres, les résultats obtenus seront variables.

Le tableau 5.2 démontre notamment l'influence du système de combustion utilisé et permet également de comparer les émissions relatives au bois, aux bûches ou granules de bois densifié, au charbon, au mazout et au gaz naturel. Dans ce tableau, l'absence d'émissions de CO<sub>2</sub> attribuée à la chaudière à copeaux ou à granules, à la chaudière moderne à bûches ou poêle certifié EPA et le poêle non certifié EPA, s'explique par le fait que les auteurs considèrent la biomasse forestière comme une source d'énergie carboneutre, ce qui ne représente pas la position prise dans cet essai.

**Tableau 5.2 Émissions de différents polluants en fonction du type de système et de combustible** (inspiré de : MFFP, 2011)

Type de système et de combustible	Efficacité (%)	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	COV et HAP	CO	CO <sub>2</sub>	Particules
		mg/MJ					
Chaudière au mazout	75	220	55	10	50	78 000	5
Chaudière au gaz naturel	75	0,25	40	5	50	51 000	0,8
Chaudière au charbon	-	340	70	10	4 500	104 000	60
Chaudière à copeaux ou à granules	75	10	45	2	16	0	4

**Tableau 5.2 Émissions de différents polluants en fonction du type de système et de combustible** (inspiré de : MFFP, 2011) (suite)

Type de système et de combustible	Efficacité (%)	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	COV et HAP	CO	CO <sub>2</sub>	Particules
		mg/MJ					
<b>Chaudière moderne à bûches ou poêle certifié EPA</b>	75	10	70	700	366	0	32
<b>Poêle non certifié EPA</b>	40	10	70	2 100	6 000	0	520

En trop grande concentration dans l'air, ces polluants peuvent affecter la santé humaine. Surtout chez les personnes vulnérables qui se distinguent par leur âge (enfants ou personnes en âge avancé) ou par leur condition (asthme, emphyseme et problèmes cardiaques). (MELCC, s. d.) Les effets connus de ses polluants sont illustrés au tableau 5.3. La science s'est beaucoup concentrée sur les effets plus sévères reliés à la combustion de bois, peu de connaissances existent par rapport aux effets à long terme d'une exposition à de telles émissions (Petrov, 2012).

**Tableau 5.3 Effets potentiels sur la santé, de certains contaminants issus de la fumée de bois lorsque leur concentration est trop élevée dans l'air** (inspiré de : MELCC, s. d.)

Contaminants		Effets
Monoxyde de carbone	CO	Maux de tête, nausées, étourdissements et aggravation de l'angine chez les personnes ayant des problèmes cardiaques
Composés organiques volatils	COV	Irritation des voies respiratoires et maux respiratoires; certains COV sont cancérigènes (ex. benzène)
Particules fines	PM <sub>2,5</sub>	Irritation des yeux et des voies respiratoires
Oxydes d'azote	NO <sub>x</sub>	Irritation des voies pulmonaires, aggravation des maladies cardiorespiratoires et mortalité plus hâtive
Hydrocarbures aromatiques polycycliques	HAP	Certains HAP sont considérés comme mutagènes ou cancérigènes ou sont soupçonnés de l'être
Dioxines et furannes	-	Cancérigènes probables

En définitive, les préoccupations en matière de qualité de l'air sont fondées. Il est cependant impossible de généraliser les émissions à l'ensemble des installations de combustion; c'est du cas par cas. En revanche, on peut suggérer que l'implantation d'une chaufferie à la biomasse forestière n'est probablement pas appropriée dans les grands centres urbains où déjà des problèmes de pollution atmosphérique (ex. smog) ont lieu. Même si certaines technologies permettent de limiter les émissions à

un niveau relativement bas, la cumulation des émissions de l'ensemble des activités de ces centres pourrait faire en sorte que la combustion de biomasse forestière ne ferait qu'accentuer le problème de qualité de l'air, ce qui n'est pas souhaitable. De plus, cela ne veut pas dire que la production d'énergie à partir de la biomasse forestière en région est dans tous les cas le meilleur choix. Effectivement, même à l'extérieur des centres urbains, des problématiques de pollution de l'air peuvent exister, on pourrait penser à l'existence d'une industrie polluante. C'est pourquoi le contexte dans lequel la technologie sera implantée doit être considéré. Tout ceci démontre l'intérêt de réaliser une cartographie à l'échelle fine afin d'identifier les zones où l'implantation de chaufferies à la biomasse aura un faible impact sur la qualité de l'air conjointement avec les autres activités locales. (M. Béland, conversation téléphonique, 2 juin 2020)

### **5.2.3. Indépendance et sécurité énergétique**

Tel que démontré dans le chapitre 4, le Québec dépend encore beaucoup du marché de l'importation pour ses ressources énergétiques malgré la place importante que l'hydroélectricité occupe. Il s'avère donc pertinent de s'interroger sur le potentiel qu'a la biomasse forestière en ce qui concerne le renforcement de l'indépendance ainsi que la sécurité énergétique de la province. Avec plus de la moitié de sa consommation en énergie qui est reliée aux hydrocarbures produits à l'extérieur des frontières du Québec, il pourrait être avantageux de miser sur une ressource renouvelable produite et consommée localement afin de se soustraire des risques associés à ce type d'importation (ex. variabilité des prix, difficulté en approvisionnement, etc.), tout en diminuant notre dépendance aux énergies fossiles importées. Diverses sources mentionnent d'ailleurs plusieurs bénéfices que la biomasse peut apporter en termes de sécurité énergétique ainsi que les avantages de diversifier les approvisionnements en énergie. (Demirbas, 2001; Domac, Richards et Risovic, 2005; Lunnan et al., 2008; Hydro-Québec, 2014). Avec notre climat rigoureux, la sécurité énergétique est un élément essentiel et la biomasse forestière est une avenue intéressante pour progresser dans cette direction (Vision Biomasse Québec, 2015a). Étant donné que la biomasse est produite au Québec et consommée au Québec, elle permet de protéger la province des aléas internationaux qui peuvent affecter les énergies fossiles. Les circuits courts sur lesquels la filière de la biomasse forestière est bâtie la rendent moins vulnérable aux difficultés d'approvisionnement. De plus, Vision Biomasse Québec (2015a) note qu'en régions éloignées, la biomasse forestière, pour la production combinée de chaleur et d'électricité, serait intéressante dans le but de varier les modes de production d'énergie et ainsi d'augmenter la sécurité énergétique de ces communautés. Dans ce cas, la biomasse serait complémentaire aux réseaux autonomes d'Hydro-Québec. La biomasse forestière peut également diminuer la demande élevée en électricité pendant les périodes de pointe hivernale (EcoTec, 2012).

L'exemple de la crise du propane de l'automne 2019 qui a frappé durement le secteur agricole québécois témoigne de la fragilité des réseaux d'approvisionnement et de l'importance de la sécurité énergétique. En raison d'une grève à la Compagnie des chemins de fer nationaux du Canada (CN), l'approvisionnement de propane acheminé par rails a subitement cessé, privant ainsi de nombreux agriculteurs de cette ressource dont ils sont dépendants, soit pour chauffer leur porcherie ou leur poulailler, soit pour sécher leurs grains de maïs (Saulnier, 2019, 3 décembre; Léveillé, 2019, 24 décembre). À la suite de cette pénurie, ceux qui avaient déjà fait la conversion pour des systèmes fonctionnant à la biomasse forestière ont pu éviter les contrecoups de cette crise, tandis que chez ceux possédant encore des installations au propane, un grand nombre d'entre eux ont enfin décidé de se convertir. Les installations à la biomasse forestière sont plus coûteuses, mais le prix de la ressource l'est beaucoup moins. De ce fait, plusieurs agriculteurs ont pu rentabiliser leur investissement après seulement quelques années, tout en sécurisant leur approvisionnement en énergie. (Léveillé, 2019, 24 décembre)

La biomasse forestière s'avère donc être une solution invitante pour progresser vers l'indépendance énergétique tout en contribuant à la diminution de l'empreinte carbone du secteur de l'énergie et à l'amélioration de la balance commerciale du Québec, estimée à 255 millions de dollars chaque année (Vision Biomasse Québec, 2015; J-F. Samray, conversation téléphonique, 25 juin 2020).

#### **5.2.4. Participation des communautés autochtones**

La participation des communautés autochtones dans les projets énergétiques au Québec est souhaitable. Elle permet de dynamiser ces communautés et d'engendrer des retombées économiques intéressantes pour celles-ci, notamment par la création d'emplois durables. L'implication des communautés autochtones dans les projets de production d'énergie durable, dans lesquels elles seraient propriétaires, favoriserait leur intégration au sein de l'économie du Québec tout en réduisant leur dépendance aux énergies fossiles. Elle aurait également pour effet d'améliorer leurs conditions socio-économiques par rapport aux communautés allochtones.

Afin d'encourager l'émergence de ce type de projets, nous pouvons souligner la mise en place, par le gouvernement du Canada, de l'Initiative de foresterie autochtone. Ce programme offre du financement pour différents types de projets dans les communautés autochtones, dont ceux mettant de l'avant la participation à la bioéconomie forestière. Ainsi, les projets de conversion énergétique à la biomasse forestière sont admissibles. (Gouvernement du Canada, 2020a) Le gouvernement fédéral a également mis en œuvre le programme Énergie propre pour les collectivités rurales et éloignées qui a déjà financé de

nombreux projets à la biomasse forestière dans les communautés autochtones (Gouvernement du Canada, 2020b).

L'entreprise Inukshuk Synergie est un bon exemple concret qui démontre que l'intégration des communautés autochtones dans l'économie verte au Québec est possible. Cette dernière est même bénéfique au niveau du développement économique dans les communautés isolées et de la réduction des émissions de GES. Cette entreprise vise à créer des partenariats avec ces communautés en proposant des alternatives vertes avec un service clés en main, qui ultimement, améliorent leur autonomie et leur situation socio-économique. Elle mise d'ailleurs sur son expertise dans la production d'énergie à partir de la biomasse forestière afin de réduire la dépendance de ces régions hors réseau aux sources fossiles d'énergie, comme le diesel. (Inukshuk Synergie, s. d.)

### **5.3. Les enjeux économiques**

Les enjeux économiques reliés à l'utilisation de la biomasse forestière doivent être considérés pour assurer la durabilité de la filière. La stimulation de l'économie régionale, la rentabilité financière des projets, la stabilité de l'approvisionnement tout comme l'appui financier au développement de la filière sont des enjeux primordiaux de la dimension économique.

#### **5.3.1. Stimulation de l'économie régionale**

Le développement de la filière de la biomasse forestière serait bénéfique pour la stimulation et la diversification de l'économie régionale (Demirbas, 2001; Hydro-Québec, 2014; Lachance, 2015). Il s'insère même dans le cadre de l'économie circulaire en permettant d'optimiser l'utilisation de la ressource. La filière peut également permettre de consolider une économie solidaire et sociale, qui elle, favoriserait entre autres le sentiment d'appartenance de la population vis-à-vis des projets bioénergétiques. De plus, elle peut constituer un levier efficace notamment pour la création et le maintien d'emplois durables et spécialisés en région (Hydro-Québec, 2014; M. Béland, conversation téléphonique, 2 juin 2020). Ces emplois seraient rattachés à plusieurs activités dont la récolte, le conditionnement/préparation, le transport, la valorisation et aussi les activités de recherches et de développement dans le secteur du bois-énergie (MERN, 2015). Toute proportion gardée, en termes de consommation, la production d'énergie à partir de la biomasse forestière engendrerait quatre fois plus d'emplois qu'en génère celle produite avec les énergies fossiles (MFFP, 2006). Après, en comparaison avec la filière de l'énergie éolienne, la biomasse forestière aurait également une longueur d'avance au niveau de la création d'emploi, et ce, autant

pendant la phase de construction que pendant celle de l'opérationnalisation. En effet, pour chaque 100 MW d'énergie produit, l'éolien créerait 136 emplois lors de la construction et 25 emplois lors de l'opérationnalisation des installations. En ce qui a trait à la biomasse forestière, c'est plutôt 783 emplois/100 MW pour la phase de construction et 225 emplois/100 MW pour l'opérationnalisation. En ajout, ce ne serait pas moins de 16 000 emplois qui seraient générés à chaque tranche de 1 000 000 de tonnes anhydres de biomasse forestière valorisée énergétiquement. Au moins 25 % de ceux-ci seraient durables, dans le sens où ils seraient sollicités tout au long de la phase d'exploitation. (Vision Biomasse Québec, 2015b) Un des aspects importants de l'enjeu économique de la biomasse forestière est que les retombées économiques bénéficieraient primordialement aux régions, ce qui constitue un avantage certain de cette filière par rapport aux énergies fossiles. Ces retombées économiques induites par la stimulation de l'économie locale, mais aussi par la diminution des coûts en énergie, peuvent dégager des sommes d'argent pouvant ensuite être à leur tour réinvesties dans la communauté. (J-F. Samray, conversation téléphonique, 25 juin 2020) D'ailleurs, en Europe (ex. Finlande, Autriche, Suède) le secteur du bois-énergie a été identifié comme un élément favorisant le développement et les emplois locaux (MFFP, 2006).

Les projets de conversion énergétique à la biomasse forestière peuvent de même contribuer à maintenir l'accessibilité des services de proximité en région en allégeant les dépenses en chauffage des bâtiments. Les coûts associés au chauffage peuvent parfois motiver la fermeture de ces points de services. (M. Béland, conversation téléphonique, 2 juin 2020) Ainsi, il serait possible de stimuler l'économie des régions du Québec avec le développement de la filière de la biomasse forestière, en profitant des retombées économiques positives qu'elle peut avoir au sein d'une communauté.

### **5.3.2. Rentabilité économique**

La biomasse forestière représente un choix économique pour la production d'énergie. Parmi les différents types d'énergie, elle serait l'une des plus rentables. Du moins, sur le long terme. En regard du coût du combustible, la biomasse forestière s'avère être très compétitive vis-à-vis des énergies fossiles, lesquelles sont également soumises à la taxe carbone. En effet, son coût représente une proportion plus faible des coûts totaux de l'énergie, soit de 30 % à 40 % de ceux-ci. Dans une chaufferie fonctionnant aux énergies fossiles, c'est plutôt de 80 % à 90 % des coûts qui sont associés à l'acquisition du combustible lui-même. (FQCF, 2013) Cet avantage économique que procure la biomasse forestière aura pour effet de contribuer à raccourcir la période de retour sur investissement (PRI). D'ailleurs, même en comparant le coût de

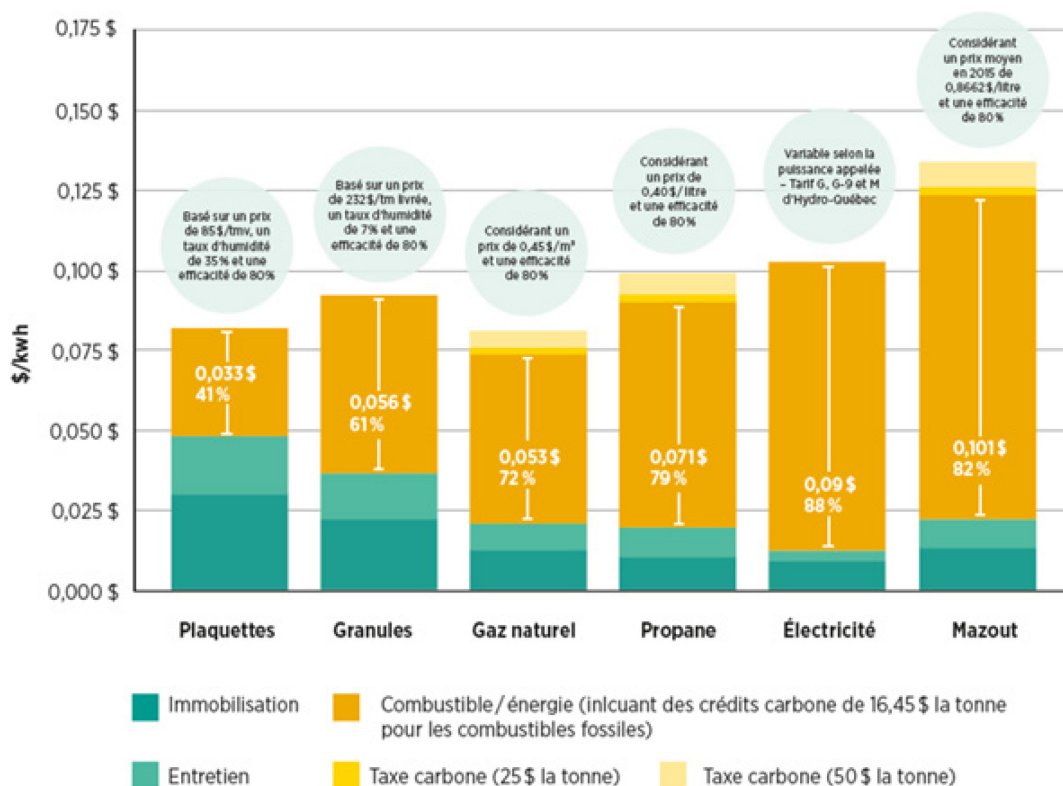
revient avec les différents choix d'énergies renouvelables, la biomasse forestière reste concurrentielle (tableau 5.4). (Vision Biomasse Québec, 2015b)

**Tableau 5.4 Coût de revient de différentes filières d'énergies renouvelables** (inspiré de : Vision Biomasse Québec, 2015b)

Filières d'énergie renouvelables	Coût de revient (\$/kWh)
Hydroélectricité	0,09
Éolienne	0,08
Géothermie profonde	0,22 à 0,32
Solaire	0,19 à 0,23
Biomasse	0,06 à 0,116

Cependant, un des désavantages de cette filière dans le cadre de la production de chaleur, est le montant d'argent devant être investi au départ dans l'immobilisation, lequel est plus élevé en comparaison avec les autres options associées aux combustibles fossiles. Les coûts relatifs à l'entretien et l'opération sont également supérieurs par rapport aux alternatives fossiles. (FQCF, 2013; Service Forêt-Énergie, 2018) Les installations fonctionnant à la biomasse forestière demandent également une attention particulière au niveau de la maintenance et de la surveillance des équipements (J. Gobeil, conversation téléphonique, 13 juillet 2020). L'ampleur de l'investissement va, entre autres, varier en fonction du type de chaudière installé, de la technologie d'épuration des gaz et de l'infrastructure à mettre en place (ex. bâtiment) (MFFP, 2006). La figure 5.3 illustre bien la réalité de ces coûts fixes plus élevés, mais aussi du faible prix du combustible qui, en fin de compte, joue pour beaucoup dans l'intérêt économique qu'on peut accorder aux plaquettes et aux granules. À ce propos, malgré le prix du combustible, il n'est pas réaliste sur le plan économique de transporter la biomasse forestière sur de longues distances. Il est donc souvent suggéré que la chaîne d'approvisionnement n'excède pas 100km, car il est difficile de justifier de tels déplacements en prenant en compte la faible densité énergétique de la ressource. (Morency, 2011) On se rend compte également, à l'aide de cette même figure, que l'aide financière de 50 % proposée par le gouvernement permet d'équilibrer les coûts en immobilisation à un niveau similaire à celui des autres formes d'énergie. De plus, comme les coûts d'immobilisation sont plus élevés avec les installations fonctionnant aux plaquettes, il n'est pas intéressant de les utiliser dans une chaudière de faible puissance (ex. <70 kW). C'est d'ailleurs pourquoi dans ce type de chaudières les granules sont habituellement privilégiées, et ce, malgré leur prix plus élevé, car ce dernier sera balancé par les plus petits volumes de matière nécessaires. (FQCF, 2013)





**Figure 5.3 Comparaison des coûts d'énergie pour le chauffage** (tiré de : Service Forêt-Énergie, 2018)

Malgré la cherté des installations de combustion, la ressource est somme toute appréciée pour sa stabilité en matière de coûts comparativement aux autres options qui existent pour la production de chaleur (ex. mazout et propane). D'abord, la fluctuation des prix des combustibles fossiles n'est pas comparable à celle que l'on peut observer avec la biomasse forestière qui, elle, est bien plus stable à ce niveau. Entre 1990 et 2010, le prix du propane, du mazout léger et du mazout lourd a connu une hausse annuelle de 6,04 %, 6,69 % et 10,09 % respectivement. Quant au gaz naturel (entre 4,29 % et 5,09 %) et à l'électricité (entre 1,96 % et 2,50 %), les variations sont moindres et fluctuent en fonction du secteur visé (résidentiel, commercial, industriel). La biomasse forestière, à savoir les copeaux (2,20 %) et les granules (2,14 %), se rapproche davantage de l'électricité et varie plus faiblement chaque année. (EcoTec, 2012) Ensuite, outre le prix du combustible, les autres coûts engendrés par les installations à la biomasse forestière sont stables. On parle ici de l'amortissement des immobilisations, mais également des sommes nécessaires pour entretenir et opérer les équipements. (Service Forêt-Énergie, 2018) On peut donc inférer que cette filière est relativement stable dans le temps, à ce niveau, ce qui lui procure un avantage.

La PRI est un élément important à analyser puisque plus elle est réduite au minimum, plus un projet sera rentable. Cet indicateur est variable et dépendra, de façon générale, de la puissance des installations. Selon les estimations de FQCF (2013) réalisées dans un contexte de marché de 2012, elle peut varier entre 3,4 ans (4000 kW) et 11,8 ans (50 kW) en prenant en compte un appui financier de 50 %. Les chaudières d'une puissance de 150 kW, 500 kW et 2000 kW ont une PRI se situant entre les deux, soit de 7 ans, 5,6 ans et 5,3 ans respectivement. Dans ces conditions, considérant que la durée de vie moyenne de telles installations est d'approximativement 25 ou 30 ans, la rentabilité économique à long terme est possible et même attrayante. (FQCF, 2013) Les sommes épargnées en termes de coûts énergétiques peuvent être considérables, comme ce fut le cas pour les trois cas donnés en exemples à la section 4.2 du présent essai.

En ajout, Vision Biomasse Québec (2015c) a identifié cinq éléments clés jouant un rôle crucial dans le succès et la rentabilité des projets de chauffage à la biomasse. Avec l'expérience acquise à travers les différents projets, qui parfois ont éprouvé quelques difficultés, et le gain en maturité de la filière, les conditions gagnantes sont désormais mieux définies :

1. Utiliser une technologie ayant fait ses preuves et qui est adaptée aux besoins énergétiques;
2. Respecter les exigences du fabricant en ce qui a trait aux caractéristiques du combustible devant être utilisé;
3. Avoir accès à un service à la clientèle adéquat au niveau de l'approvisionnement et de l'entretien des installations;
4. Avoir accès à un approvisionnement stable qui répond aux besoins en volume de biomasse forestière et qui répond aux exigences en termes de qualité de combustible (granulométrie, taux d'humidité et absence de contaminants);
5. Avoir accès à une aide financière pour l'acquisition d'immobilisation.

En guise d'exemple, le simple fait d'avoir un opérateur de chaufferie inexpérimenté pourrait nuire au bon fonctionnement du système et au succès du projet en général. Opérer une chaudière à la biomasse forestière est bien différent et bien plus technique qu'opérer un poêle à bois résidentiel, cela demande un minimum de formation. Ainsi, dans l'éventualité où une chaufferie n'est pas entretenue ou utilisée de la bonne façon, des bris, de l'usure prématurée et une perte de rendement peuvent se manifester. Ceci témoigne de la nécessité d'offrir une formation aux opérateurs de chaufferies afin de ne pas nuire au succès d'un projet spécifique, mais aussi pour ne pas compromettre le bon développement de la filière de manière générale. (M. Béland, conversation téléphonique, 2 juin 2020) Jean Gobeil de chez Gobeil Dion &

Associés Inc. confirme également le besoin de plus de formation chez les opérateurs de chaufferie (J. Gobeil, conversation téléphonique, 13 juillet 2020).

### **5.3.3. Fiabilité de l’approvisionnement**

La fiabilité de l’approvisionnement en combustible est à n’en pas douter un facteur clé dans tout projet de production d’énergie à partir de biomasse forestière. À l’échelle de la province, on peut faire le constat général que la disponibilité brute en combustible n’est pas déficiente, mais que la chaîne d’approvisionnement n’est pas encore totalement structurée. Il y a encore trop peu de projets utilisant la biomasse forestière au Québec pour structurer l’approvisionnement et mettre en place la logistique nécessaire. Pour que cela se fasse, il faut d’abord que des producteurs de biomasse se mettent en place pour, d’une part, fournir le combustible, et d’autre part, le livrer aux installations. On peut donc avancer que ce manque de structuration au Québec est actuellement un frein au déploiement des projets de chauffage dans certaines régions. Aux endroits où peu ou pas de producteurs de biomasse forestière sont présents, l’atteinte d’une masse intéressante de projets en inciterait plusieurs à se lancer. (J. Gobeil, conversation téléphonique, 13 juillet 2020) C’est pourquoi, à court terme, les actions visant à multiplier le nombre de projets sur le territoire seraient bénéfiques.

La qualité du combustible est également importante, car elle doit rencontrer les exigences du système de combustion utilisé. De manière générale, les chaudières de petites et moyennes dimensions sont plus exigeantes au niveau des caractéristiques du combustible comparativement aux usines de cogénération de grande dimension. La biomasse forestière qui approvisionne une unité de chauffage doit typiquement répondre à trois critères :

1. Le taux d’humidité;
2. La granulométrie (grosseur et forme des copeaux);
3. L’absence de contaminant et le taux de cendre. (FQCF, s. d.)

Comme les plaquettes forestières ne sont pas normalisées, le respect des trois critères précédemment énumérés est particulièrement important. Premièrement, le taux d’humidité du combustible doit être considéré en amont du choix de la chaudière, car il existe des chaudières adaptées au bois plus ou moins humide. En effet, certains modèles de chaudière sont conçus pour la combustion de matériel à taux d’humidité supérieur à 50 %. Une fois le choix arrêté sur une chaudière, il est utile d’avoir accès à un combustible qui présente des propriétés stables. Ceci permettra d’obtenir un rendement constant avec le

système. De plus, il est à savoir qu'un matériel à taux d'humidité élevé fournira typiquement moins d'énergie lors de sa valorisation. En guise d'exemple, la combustion d'une tonne de biomasse forestière à un taux d'humidité de 50 % dégagera 2200 kWh d'énergie, tandis que la même quantité de matière à un taux d'humidité plus bas, par exemple 33 %, engendre 50 % plus d'énergie, à savoir 3200 kWh. Deuxièmement, la granulométrie, soit la grosseur et la forme des copeaux, est particulièrement importante pour le mécanisme de la chaudière utilisé afin d'alimenter son foyer. Dans un cas de figure où la granulométrie serait très variable, les risques d'obstruction du mécanisme sont plus grands. Le respect de ce critère permet donc à la chaudière de fonctionner sans tracas. Troisièmement, la présence de contaminants (ex. gravier, sable ou terre) et d'écorce aura un effet sur le taux de cendre obtenu. Si celui-ci est élevé, il est possible qu'un système de décendrage plus performant soit nécessaire, faisant en même temps augmenter le coût des installations et limitant les possibilités d'utilisation en tant qu'agent fertilisant. (FQCF, s. d.)

La FQCF (s. d.) fait d'ailleurs mention de trois caractéristiques qui, mises en ensemble, font qu'une chaîne d'approvisionnement est efficace et sécuritaire. Ces dernières sont :

1. Un approvisionnement garanti en toutes circonstances et sur de nombreuses années;
2. Un produit de qualité aux caractéristiques (humidité et granulométrie) relativement uniformes et stables, facilitant ainsi les opérations de la chaufferie;
3. Un produit au meilleur rapport qualité/prix qui tient compte des exigences précédentes et de la valeur réelle du produit considérant son pouvoir calorifique optimum.

Pour y arriver, la FQCF souligne l'importance de la création de centres de transformation et de conditionnement de la biomasse forestière (CTCB). Un CTCB permet de stocker la biomasse forestière dans de bonnes conditions (ex. à l'abri des intempéries), mais aussi de la transformer et de la conditionner pour qu'elle réponde aux exigences des clients (FQCF, s. d.). Pour Jean Gobeil, l'implantation de ce type d'infrastructure permet d'améliorer la fiabilité de l'approvisionnement (J. Gobeil, conversation téléphonique, 13 juillet 2020). Cependant, pour justifier une telle infrastructure, il faut que les volumes soient au rendez-vous. (Jean-Pierre Bourque, conversation téléphonique, 13 juillet 2020) Au Québec, des CTCB sont en opération dans plusieurs municipalités régionales de comté (MRC), dont : MRC de la Matapédia, MRC des Laurentides, MRC de Montmagny, MRC d'Abitibi-Ouest, MRC de Kamouraska, MRC de Lac-Saint-Jean-Est, MRC du Fjord-du-Saguenay et MRC de Bonaventure (Vision Biomasse Québec, 2015b).

Les CTCB ont plusieurs avantages. Par exemple, ils permettent de réaliser des économies d'échelle en raison de la gestion de plus grands volumes de biomasse et de faire de la mise en copeaux en fonction de la demande. En outre, leur implantation doit être faite de façon stratégique pour que cela soit financièrement intéressant. À ce propos, la proximité du CTCB avec la clientèle doit être réduite au minimum. (Jean-Pierre Bourque, conversation téléphonique, 13 juillet 2020)

#### **5.3.4. Appui financier au développement de la filière**

Afin de stimuler la filière du bois-énergie, le gouvernement du Québec a procédé en 2017 à la relance du Programme biomasse forestière résiduelle, qui résulte de la fusion du Programme de réduction de la consommation du mazout lourd et du Programme d'aide à l'utilisation de la biomasse forestière pour le chauffage. Celui-ci a pour objectif de diminuer les émissions de GES par l'entremise de la réduction de la consommation des énergies fossiles, tout en développant la filière naissante. Et cela, en rendant disponible du financement, à l'aide du Fonds vert, pour des projets de conversion énergétique à la biomasse forestière résiduelle. Ce sont les entreprises, les municipalités et les institutions qui y ont droit, dans la mesure où celles-ci utilisent des combustibles fossiles et qu'elles prennent part à un processus de conversion pour en diminuer leur consommation. Le financement est d'ailleurs accessible autant pour les petits joueurs ayant une consommation inférieure à 36 000 GJ/année que pour les plus grands consommateurs d'énergie qui dépassent ce seuil. De plus, l'aide financière couvre à la fois la phase d'analyse du projet et la phase d'implantation à une hauteur de 50 % des coûts totaux, et ce par demande et par site, pour une aide maximale de 3 000 000 \$ toute catégorie de clientèle confondue. (TEQ, s. d.) Initialement lancé en 2013, le programme a été victime de sa popularité et l'enveloppe budgétaire avait été rapidement vidée. Lors de la relance du programme en 2017, c'est un montant de 50 millions de dollars qui a été alloué pour le financement de projets de conversion, entre 2018 et 2021. De plus, en 2018, le gouvernement a bonifié cette somme à l'aide de 45 millions de dollars supplémentaires, ce qui a établi le budget total du programme à 95 millions de dollars. (Service Forêt-Énergie, 2018)

Ce financement offert par le gouvernement du Québec est donc intéressant pour motiver le développement de projets de chauffage à la biomasse forestière. D'ailleurs, sans celui-ci, la filière ne serait pas au même stade qu'elle est aujourd'hui et beaucoup moins de projets seraient en marche. En effet, rares sont ceux qui se lancent sans appui financier, car le coût des projets est élevé. (J. Gobeil, conversation téléphonique, 13 juillet 2020) On peut donc le qualifier de nécessaire en début de filière, surtout en prenant en compte les coûts initiaux onéreux reliés à l'immobilisation et le fait que certains promoteurs peuvent avoir une capacité financière limitée (ex. faible capacité d'emprunter). Cependant, le financement

de 50 % des projets rend ce programme moins attrayant vis-à-vis des autres énergies renouvelables dont le développement est davantage financé par d'autres programmes. En effet, les programmes Chauffez vert – Commerces, institutions et industries et ÉcoPerformance offrent une aide financière pour la conversion vers des sources d'énergies à faibles émissions (ex. solaire, éolien, géothermie) qui couvre 75 % des coûts. De cette façon, la filière de la biomasse forestière est, à travers son programme, en quelque sorte désavantagée par rapport aux autres ressources renouvelables. L'écart de 25 % en termes de financement entre ces programmes peut encourager une entreprise à utiliser le programme compétiteur pour une raison financière évidente. De plus, comme le budget du programme est limité, le gouvernement s'assure de filtrer les projets en sélectionnant entre autres les projets aux plus grands bénéfices de réduction de GES. Ceci est en soi un choix logique dans le contexte du programme et de sa capacité financière. Cependant, cela n'a pas pour effet de structurer la filière de la biomasse forestière comme le dit Mathieu Béland de chez Vision Biomasse Québec. (M. Béland, conversation téléphonique, 2 juin 2020) Il est d'ailleurs important d'assurer du financement continu à court et moyen terme pour lancer la jeune filière de la biomasse forestière et pour structurer autant l'approvisionnement que les différents acteurs de ce secteur (opérateurs, vendeurs de chaudières, etc.). La coupure du Programme biomasse forestière résiduelle en 2013 n'était pas souhaitable. De telles coupures handicapent le bon développement de l'ensemble de la filière.

De façon générale, les projets sont répandus de façon un peu trop sporadique sur le territoire pour réellement mettre en place une structure solide et professionnelle de la biomasse forestière dans l'ensemble des régions. Une structure qui doit, entre autres, permettre un approvisionnement stable en biomasse et qui répond aux exigences spécifiques des chaufferies. Il est difficile d'optimiser la chaîne de valeur dans une région où trop peu de projets se développeraient. Un plus grand nombre de projets est ainsi nécessaire et c'est à ce moment que le programme doit aider à bâtir les infrastructures qui contribueront au développement de la filière. (Vision Biomasse Québec, 2015b)

## **6. ANALYSE DES ENJEUX**

Ce chapitre a comme objectif d'évaluer dans quelle mesure l'utilisation de la biomasse forestière comme source d'énergie correspond à une démarche de développement durable pour la société québécoise. Ceci sera fait par l'analyse des enjeux environnementaux, sociaux et économiques, effectuée à l'aide d'un outil d'analyse présenté ci-après. Les enjeux ont précédemment été explicités au chapitre 5 et les évaluations se baseront sur les informations qu'il contient. L'utilisation d'un tel outil d'analyse permet l'opérationnalisation des principes de développement durable.

### **6.1 Présentation de l'outil**

Afin d'atteindre l'objectif du présent chapitre, un outil d'analyse sera développé et adapté à partir de la Grille d'analyse de développement durable (GADD) conçue par la Chaire en éco-conseil de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC). Elle a d'ailleurs été utilisée à de nombreuses reprises depuis 25 ans. Celle-ci sera adaptée en fonction des besoins de cet essai, mais l'outil ici utilisé en sera grandement inspiré. Typiquement, la GADD permet d'analyser une politique, une stratégie, un programme ou un projet (PSPP) et d'identifier leurs faiblesses tout comme leurs forces en matière de développement durable. Cette démarche conduit à des recommandations pertinentes visant à rapprocher les PSPP des principes de la durabilité. (Villeneuve, Riffon et Tremblay, 2016)

La GADD est un outil de questionnement systémique d'ordre qualitatif comprenant six dimensions, dont trois (environnementale, sociale et économique) seront abordées ici. Chacune d'elle contient un certain nombre de critères d'évaluation (section 6.1.2) qui font l'objet d'une pondération et d'une évaluation (sections 6.1.1 et 6.2). Plus loin, les résultats seront discutés et justifiés (section 6.3).

#### **6.1.1 Pondération**

Un système de pondération sera utilisé afin d'octroyer un poids (coefficient de pondération) aux critères d'évaluation en fonction de leur importance. Ainsi, plus un critère sera déterminant dans l'optique du développement durable de la filière, plus il sera pondéré à la hausse; le contraire est aussi vrai. Cette façon de faire permettra donc d'adapter l'évaluation à la réalité et au contexte de l'analyse (Villeneuve, Riffon et Tremblay, 2016). Le système utilise une échelle de valeurs numériques de 1 à 3 qui est présentée au tableau 6.1.

**Tableau 6.1 Système de pondération** (inspiré de : Villeneuve, Riffon et Tremblay, 2016)

Valeur	Signification
1	<b>Souhaitable</b> : il est peu important de considérer ce critère.
2	<b>Important</b> : il est important de considérer ce critère.
3	<b>Indispensable</b> : il est important, indispensable et même prioritaire de considérer ce critère.

Afin d’attribuer la bonne valeur lors de la pondération des critères, la question suivante doit-être posée à chaque fois :

*Est-il souhaitable, important ou indispensable de considérer ce critère pour que le développement de la filière se fasse de façon durable?*

### 6.1.2 Présentation des critères et évaluation

Les critères d’évaluation, regroupés par dimension, sont présentés dans le tableau 6.2. Ceux-ci serviront à analyser de façon qualitative la durabilité de la filière. À la suite de cela, chaque critère d’évaluation sera sommairement décrit afin de bien cibler leur portée et de saisir ce qu’ils évaluent. Ceci aura également pour effet de faciliter l’évaluation et la compréhension des résultats obtenus.

**Tableau 6.2 Présentation et description des critères d’évaluation pour chaque dimension**

Critère d’évaluation	Description
<b>Dimension environnementale</b>	
<b>ENV1</b> : Biodiversité	Ce critère évalue dans quelle mesure l’utilisation de la biomasse forestière résiduelle compromet la pérennité des espèces de champignons, d’oiseaux, de petits mammifères, d’amphibiens et d’invertébrés, saproxyliques ou non. Le maintien de la biodiversité entraînera une évaluation positive.
<b>ENV2</b> : Qualité de l’eau	Ce critère évalue les impacts sur la qualité de l’eau à la suite d’une récolte de biomasse forestière en milieu naturel. Le maintien de la qualité de l’eau entraînera une évaluation positive.
<b>ENV3</b> : Productivité du sol	Ce critère évalue dans quelle mesure l’exportation de la biomasse forestière peut affecter la MO, le N, le P et les cations basiques sur un site de récolte. Le maintien de la productivité du sol entraînera une évaluation positive.
<b>ENV4</b> : Productivité du peuplement	Ce critère évalue comment la forêt, en ce qui concerne sa productivité et la croissance de ses arbres, peut être affectée par la diminution des débris ligneux au sol. Le maintien de la productivité des peuplements entraînera une évaluation positive.
<b>ENV5</b> : Gestion des résidus	Ce critère évalue dans quelle mesure la gestion des résidus de fin de vie du produit énergétique est optimale et correspond au principe hiérarchique des 3RV-E. L’optimisation de la gestion des résidus entraînera une évaluation positive.
<b>ENV6</b> : Atténuation des changements climatiques	Ce critère évalue si la biomasse forestière, dans un contexte bioénergétique, permet d’atténuer les changements climatiques par la réduction des émissions de GES. Une contribution significative à l’atténuation des changements climatiques entraînera une évaluation positive.



**Tableau 6.2 Présentation et description des critères d'évaluation pour chaque dimension (suite)**

Critère d'évaluation	Description
<b>Dimension sociale</b>	
<b>SOC1</b> : Respect de la culture et des traditions locales	Ce critère évalue comment le développement de la filière respecte la culture et les traditions locales au Québec. Le respect de ces éléments entraînera une évaluation positive.
<b>SOC2</b> : Participation des communautés autochtones	Ce critère évalue si le développement de la biomasse forestière comme source d'énergie favorise la participation des communautés autochtones. L'inclusion des communautés autochtones dans la filière énergétique entraînera une évaluation positive.
<b>SOC3</b> : Santé des populations et qualité de l'air	Ce critère évalue les impacts sur la qualité de l'air (émissions de polluants) et la santé des populations. La minimalisation de ces impacts entraînera une évaluation positive.
<b>SOC4</b> : Indépendance et sécurité énergétique	Ce critère évalue les bénéfices encourus en termes d'indépendance et de sécurité énergétique. Un gain au niveau de l'indépendance et de la sécurité énergétique entraînera une évaluation positive.
<b>Dimension économique</b>	
<b>ECO1</b> : Stimulation de l'économie régionale	Ce critère évalue les bénéfices économiques induits par la filière dans les régions qui accueillent des projets de production de chaleur. Il peut donc s'agir de bénéfices en termes de création et de qualité d'emplois ou de retombées économiques au sein même des communautés d'accueil. La stimulation de l'économie régionale entraînera une évaluation positive.
<b>ECO2</b> : Viabilité économique	Ce critère évalue la capacité d'un investissement à être rentable. Cet aspect est également couplé avec la notion de période de retour sur investissement. Une bonne viabilité économique des projets entraînera une évaluation positive.
<b>ECO3</b> : Fiabilité de l'approvisionnement en combustible	Ce critère évalue la fiabilité de l'approvisionnement en combustible en termes de volume et de qualité de la biomasse forestière. Un approvisionnement fiable entraînera une évaluation positive.
<b>ECO4</b> : L'appui financier au développement de la filière	Ce critère évalue si la filière fait l'objet d'un appui financier. Si oui, il évalue dans quelle mesure cet appui répond aux besoins de la filière. Un appui financier convenable entraînera une évaluation positive.

Une fois pondérés, les critères doivent être évalués. Pour ce faire, pour chacun de ceux-ci, la question suivante sera posée :

*Dans quelle mesure ce critère influence-t-il la durabilité de la filière?*

La réponse obtenue se situera sur une échelle de 0 à 100 % et sera déterminée en fonction de son importance relative à la question précédente. Les valeurs nominales possibles ainsi que leur signification sont présentées au tableau 6.3.

**Tableau 6.3 Les évaluations et leur signification**

Évaluation	Signification
0-19 %	Ce critère a des impacts fortement négatifs sur le développement durable de la filière.
20-39 %	Ce critère a des impacts négatifs sur le développement durable de la filière.
40-59 %	Ce critère a des impacts nuls, négligeables ou incertains sur le développement durable de la filière.
60-79 %	Ce critère a des impacts positifs sur le développement durable de la filière.

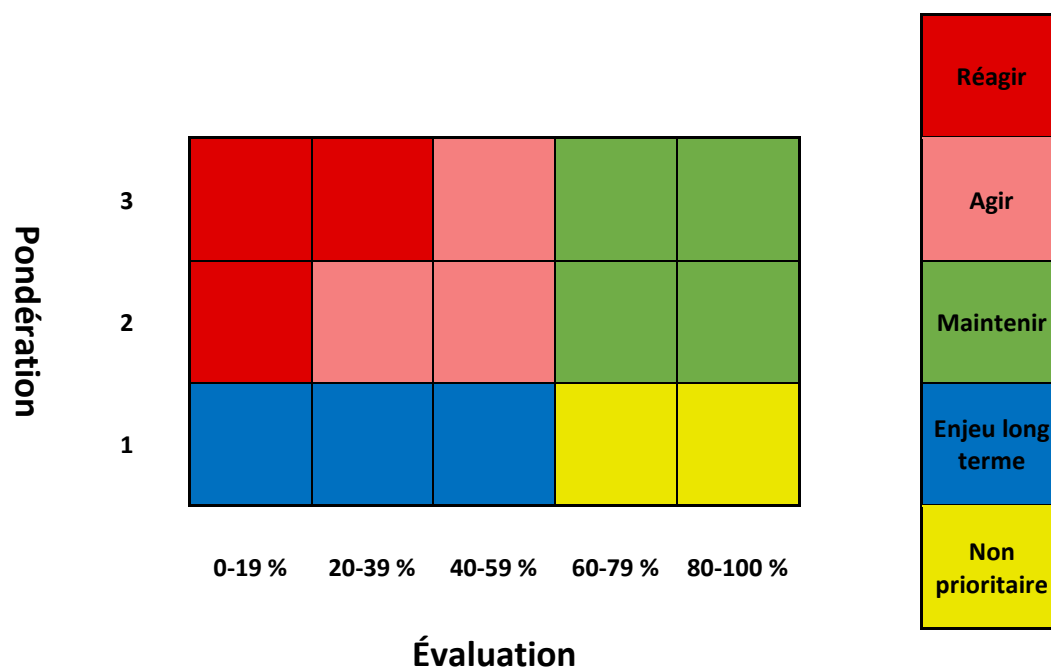
**Tableau 6.3 Les évaluations et leur signification (suite)**

Évaluation	Signification
80-100 %	Ce critère a des impacts fortement positifs sur le développement durable de la filière.

### 6.1.3 Indice de priorisation

Une méthode complémentaire sera utilisée afin de fournir un indice de priorisation pour chaque critère. Celui-ci sera établi en fonction de la pondération et de l'évaluation. Ainsi, le tableau 6.4 démontre que plus un critère aura une pondération et une évaluation faible, plus l'outil de priorisation fera état de l'importance et de l'urgence d'apporter des actions correctives.

**Tableau 6.4 Méthode de priorisation** (tiré de : Villeneuve, Riffon et Tremblay, 2016)



### 6.1.4 Limites

La méthodologie utilisée pour l'analyse des enjeux comporte certaines limites qui sont pertinentes de spécifier avant d'aborder les résultats. Premièrement, l'évaluation des critères se base sur les informations contenues dans le chapitre 5. Bien qu'un travail exhaustif ait été fait et que les informations ont été filtrées afin de privilégier les sources scientifiques fiables, actuelles, pertinentes et dont l'information est exacte, cette évaluation est tout de même circonscrite aux sources et spécialistes consultés dans cet essai.

Deuxièmement, pour une minorité d'enjeux (ex. biodiversité et productivité des sols), les connaissances scientifiques ne sont pas encore complètes. Elles sont d'ailleurs appelées à évoluer dans un futur proche, au fil de l'avancement des recherches. Dès lors, l'évaluation reflète l'état actuel des connaissances, qui elles, permettent tout de même de brosser un portrait général assez pertinent. Troisièmement, étant donné la nature qualitative de l'analyse, une certaine subjectivité demeure dans l'évaluation. Cependant, la méthodologie utilisée est appropriée et la démarche qu'elle propose permet de limiter au minimum le caractère subjectif. Quatrièmement, cette limite est davantage d'ordre technique, précisément : l'analyse des enjeux concerne l'utilisation de la biomasse forestière dans le contexte de la production de chaleur par combustion directe. Bien que de manière générale certains enjeux traités au chapitre 5 sont attribuables à l'ensemble de la filière (ex. l'enjeu relatif à la biodiversité), d'autres ciblent plus spécifiquement le domaine de la production de chaleur. Ainsi, les résultats ne seront pas entièrement transférables aux autres modes de conversion, comme celui de la fermentation pour la production d'éthanol cellulosique.

## 6.2 Résultats

Les résultats de l'évaluation sont ici présentés à l'intérieur du tableau 6.5. À savoir que dans le cadre de l'analyse des enjeux effectuée dans cet essai, le seuil de durabilité est établi à 60 %. Ainsi, une note sous ce seuil signifie que la filière ne répond pas aux principes du développement durable. Cependant, une note supérieure à ce seuil ne veut pas pour autant dire que ces aspects ne devraient pas faire l'objet d'actions amélioratives dans le but de parfaire leur durabilité.

Le résultat global de 70 % pour l'ensemble des dimensions démontre que l'utilisation de la biomasse forestière pour la production de chaleur peut se faire dans une démarche de développement durable.

**Tableau 6.5 Résultats d'évaluation pour chaque dimension**

Critère d'évaluation	Pondération (1 à 3)	Évaluation (%)	Évaluation pondérée (Pond. X Év.)	Priorité
<b>Dimension environnementale</b>				
<b>ENV1:</b> Biodiversité	3	52	1,56	
<b>ENV2:</b> Qualité de l'eau	3	55	1,65	
<b>ENV3:</b> Productivité du sol	3	59	1,77	
<b>ENV4:</b> Productivité du peuplement	3	57	1,71	
<b>ENV5:</b> Gestion des résidus	1	70	0,7	
<b>ENV6:</b> Atténuation des changements climatiques	3	85	2,55	

**Tableau 6.5 Résultats d'évaluation pour chaque dimension (suite)**

Critère d'évaluation	Pondération (1 à 3)	Évaluation (%)	Évaluation pondérée (Pond. X Év.)	Priorité
Résultat pour la dimension:	62			
Dimension sociale				
SOC1: Respect de la culture et des traditions locales	3	75	2,25	
SOC2: Participation des communautés autochtones	3	73	2,19	
SOC3: Santé des populations et qualité de l'air	3	65	1,95	
SOC4: Indépendance et sécurité énergétique	2	88	1,76	
Résultat pour la dimension:	74			
Dimension économique				
ECO1: Stimulation de l'économie régionale	2	88	1,76	
ECO2: Viabilité économique	3	74	2,22	
ECO3: Fiabilité de l'approvisionnement en combustible	3	66	1,98	
ECO4: L'appui financier au développement de la filière	3	70	2,1	
Résultat pour la dimension:	73			
Moyenne pour les dimensions	70			

Le pointage plus faible obtenu pour la dimension environnementale fait état du fait que la durabilité de cette dimension est susceptible d'être fragile. Ceci atteste l'intérêt que nous devrions apporter aux respects des lignes directrices afin d'encadrer la pratique. Sans oublier que dans les autres dimensions, il faut également respecter un certain cadre afin de ne pas compromettre leur durabilité. Cela ne veut pas dire que la filière ne peut pas être durable sur le plan environnemental. Cela veut dire que certaines lignes directrices doivent être comprises et appliquées pour ne pas compromettre la qualité de notre environnement.

De plus, il est bien important de comprendre que l'acceptabilité sociale de la filière est la résultante de plusieurs critères. Ainsi, dans la mesure où ceux-ci sont performants en matière de développement durable et bien compris par la population, l'acceptabilité sociale sera au rendez-vous.

### 6.3 Justifications

Les résultats de l'évaluation seront discutés ici. Ainsi, pour chaque critère d'évaluation sera donnée une justification qui appuie la note octroyée. Ces justifications seront basées sur les informations obtenues à la suite de l'analyse des enjeux du chapitre 5.

#### ENV1 : Biodiversité (52 %)

Le critère ENV1 est celui qui performe le moins bien dans l'évaluation. Cette note peut s'expliquer notamment en raison du lien étroit qu'ont plusieurs espèces avec le bois mort dans les écosystèmes forestiers. D'ailleurs, chez les champignons, les oiseaux, les petits mammifères, les amphibiens et les invertébrés, la diminution de la quantité du bois mort, qu'il soit par exemple sous forme de chicots ou de débris grossiers, a des impacts directs et indirects reconnus sur ces organismes. Les effets sur la biodiversité sont remarquablement complexes, surtout en raison du grand nombre d'espèces à considérer et du fait que chacune d'elle peut avoir des besoins et une sensibilité qui divergent des autres. Non seulement en ce qui concerne la quantité de bois mort laissé au sol, mais aussi ses diverses caractéristiques : degré de décomposition, caractéristiques structurales, espèce et taille. De façon générale, l'analyse de cet enjeu a démontré que tous les taxons étudiés pouvaient réagir négativement à une récolte de biomasse forestière. Dans certains cas plus ciblés, certaines espèces semblent réagir plus positivement, mais cela ne constitue pas la tendance générale observée au niveau de la biodiversité dans la littérature scientifique consultée. De plus, il faut mentionner que les résultats des études sont parfois en opposition. Pour toutes ces raisons, il est donc difficile à ce stade-ci de se prononcer de façon juste et totalement éclairée sur ce critère.

Comme les connaissances scientifiques à ce sujet sont encore à la fois limitées et en constante évolution, l'auteur a décidé d'attribuer une note plutôt conservatrice à ce critère. Cette décision traduit aussi son désir d'appliquer le principe de précaution.

#### ENV2 : Qualité de l'eau (55 %)

La note décernée au critère ENV2 exprime la présence d'impacts potentiels sur la physico-chimie de l'eau et sur les organismes aquatiques qui peuvent survenir lorsqu'une récolte plus intensive de biomasse forestière est pratiquée. Peu d'avantages associés au retrait des débris ligneux ont été identifiés à ce niveau. En effet, la synchronisation du rythme de fonte des neiges dans le bassin versant ne fait pas le

poids vis-à-vis des effets pouvant notamment être générés par l'augmentation de la sédimentation dans l'eau.

La pratique est tout de même encadrée par le *Règlement sur l'aménagement durable des forêts du domaine de l'État* (RADF). Effectivement, ce dernier interdit toutes pratiques d'aménagement forestier à moins de 20 mètres des tourbières ouvertes avec mare, des marais, des marécages arbustifs riverains, des lacs et des cours d'eau permanents. Ceci permet donc de créer des zones tampons afin de diminuer les impacts des activités de récolte sur la qualité de l'eau. Cependant, comme peu d'étude traite de cet enjeu, plus de recherches devraient être faites pour mieux comprendre les risques et pour identifier l'ensemble des bonnes pratiques à adopter.

Comme les connaissances scientifiques à ce sujet sont encore à la fois limitées et en constante évolution, l'auteur a décidé d'attribuer une note plutôt conservatrice à ce critère. Cette décision traduit aussi son désir d'appliquer le principe de précaution.

### **ENV3 : Productivité du sol (59 %)**

Le critère ENV3 évaluait la productivité du sol. Comme celle-ci est reliée de différentes façons à plusieurs composantes qui auront une influence sur sa fertilité, il s'avère complexe de fournir une évaluation unique. En effet, les différents éléments d'intérêts que sont la MO, le N, le P et les cations basiques (K, Ca et Mg), peuvent individuellement réagir de différentes façons en fonction de l'intensité de la récolte de biomasse forestière. De plus, la réponse de chacun de ces éléments peut être différente en fonction des conditions de site (granulométrie des particules de sol, type de dépôt, concentrations initiales, etc.). Il est donc, encore une fois, complexe de définir un comportement unique selon la quantité de débris ligneux exporter du site. La littérature scientifique permet de démontrer qu'une telle pratique peut affecter ces éléments de façon indépendante. En revanche, ce n'est pas pour autant que la productivité du sol en sera affectée significativement, bien qu'elle puisse l'être dans certaines situations. À ce sujet, les scientifiques ont pu identifier certaines caractéristiques propres aux sites sensibles. Ainsi, la récolte en ces lieux serait à éviter pour ne pas compromettre la durabilité de la filière. D'ailleurs, dans le RADF on interdit la récolte de la biomasse forestière dans une multitude de peuplements forestiers compris dans 28 types écologiques situés dans plusieurs sous-régions écologiques identifiés préalablement par Ouimet et Duchesne (2009). De ce fait, les résidus de coupe doivent être laissés sur place à proximité des souches. Cette mesure est bien accueillie dans le cadre de l'évaluation, car elle démontre une volonté de prendre en considération les sites vulnérables.

Comme les connaissances scientifiques à ce sujet sont encore à la fois limitées et en constante évolution, l’auteur a décidé d’attribuer une note plutôt conservatrice à ce critère. Cette décision traduit aussi son désir d’appliquer le principe de précaution.

#### **ENV4 : Productivité du peuplement (57 %)**

L’évaluation du critère ENV4 s’avère non moins complexe. Les impacts sur la productivité des peuplements où est faite une récolte de biomasse forestière ne sont pas uniformes dans toutes les conditions de sites et dans tous les types de peuplement. L’analyse de cet enjeu témoigne, d’une part, du fait que le maintien des débris ligneux sur le site de coupe peut nuire à la productivité et à la croissance de la forêt, et d’autre part, que dans certaines situations elle peut les favoriser. En effet, une multitude de facteurs entre en ligne de compte, dont le type de peuplement forestier. Il semblerait qu’à long terme la disponibilité en éléments nutritifs aurait une influence sur la productivité des stations forestières, tandis qu’à court terme, le microclimat et la végétation du site seraient plus influents. De plus, les effets d’une exportation répétée sur la forêt ne sont pas encore clairs et les études se situent davantage dans un horizon à court terme. Ainsi, la recherche est importante afin de comprendre les impacts sur la productivité forestière au moment de la deuxième ou troisième révolution et plus encore. Enfin, comme la quantité de débris ligneux peut avoir des impacts positifs et négatifs sur un même site de récolte, il est délicat de fournir une évaluation globale représentative.

Comme les connaissances scientifiques à ce sujet sont encore à la fois limitées et en constante évolution, l’auteur a décidé d’attribuer une note plutôt conservatrice à ce critère. Cette décision traduit aussi son désir d’appliquer le principe de précaution.

#### **ENV5 : Gestion des résidus (70 %)**

Le critère ENV5 démontre, à travers son évaluation, que la gestion des résidus peut s’harmoniser avec le développement durable de la filière. Bien que cela ne soit pas un enjeu de première nécessité, comparativement à d’autres enjeux relatifs à la biomasse forestière, il est tout de même important pour la durabilité globale de la filière. Une bonne gestion des résidus passe par une valorisation adéquate des cendres de bois issues de la combustion directe. Typiquement, c’est un peu moins de la moitié de ces résidus qui sont valorisés au Québec. Il y a donc place à amélioration. Cependant, les voies de valorisation actuelles de cendres de bois sont intéressantes et peuvent permettre d’empêcher leur enfouissement. Les possibilités de valorisation se situent principalement dans le domaine de l’agriculture et de la foresterie. Contrairement à l’usage des cendres dans le milieu agricole, leur application en forêt représente une

option plus récente qui demande d’être approfondie par la recherche. On perçoit donc un certain respect de la hiérarchie des 3RV-E.

#### **ENV6: Atténuation des changements climatiques (85 %)**

Dans l’ensemble des évaluations, le critère ENV6 détient l’une des notes les plus hautes. Il est donc considéré que l’utilisation de la biomasse forestière peut contribuer à réduire les émissions de GES à l’échelle de la province et ainsi participer à l’atténuation des changements climatiques, tout en s’insérant dans une démarche de développement durable. À savoir que lors de l’évaluation de ce critère, les scénarios les moins probables n’ont pas été considérés. Par exemple, comme il n’est pas question d’utiliser des arbres verts au Québec pour la production de bioénergie, ce scénario n’a pas eu d’effet sur l’évaluation. Dans le contexte québécois, ce sont principalement des résidus de l’industrie de la transformation du bois qui sont utilisés. Ensuite, dans une plus faible proportion, on utilise également de la biomasse forestière résiduelle et des résidus CRD qui engendrent une dette de carbone remboursable à court terme. D’autres éléments ont contribué à l’obtention d’une telle note, dont la maturité des technologies disponibles offrant une efficacité de conversion équivalente aux technologies associées aux alternatives fossiles (ex. mazout lourd, mazout léger et propane), les faibles émissions de GES associées à la chaîne d’approvisionnement, et puis le fait que sont ciblées en priorité, pour la substitution, les énergies fossiles les plus polluantes. Tout bien considéré, la filière a la capacité de réduire les émissions de carbone du Québec et cela a d’ailleurs déjà été prouvé dans le cadre de plusieurs projets, dont certains ont été analysés dans cet essai. Même si les bénéfices GES ne sont pas obtenus à l’instant même de la combustion du bois, mais dans un horizon variant entre le court et long terme, ils sont assez intéressants pour légitimer cette pratique.

#### **SOC1: Respect de la culture et des traditions locales (75 %)**

L’évaluation attribuée au critère SOC1 reflète le fait que l’industrie forestière est bien implantée partout au Québec et depuis longtemps. L’exploitation de la ressource ligneuse fait partie intégrante de l’histoire du Québec et la population n’est d’ailleurs pas étrangère à cette industrie. Ainsi, il est possible d’avancer que l’exploitation de la biomasse forestière respecte bien la culture et les traditions locales. La valorisation énergétique du bois ne date pas d’hier, le bois de chauffage est encore aujourd’hui très courant pour le chauffage des habitations. La venue de technologies modernes pour la combustion du bois continue dans la même veine. On peut cependant souligner que l’évaluation de ce critère est plus basse en milieu urbain,



en raison d'un plus grand détachement vis-à-vis de l'industrie forestière. D'ailleurs, en ville, les projets à partir de la biomasse forestière sont perçus plus négativement qu'en régions.

#### **SOC2 : Participation des communautés autochtones (73 %)**

Le critère SOC2 a été évalué de manière positive dans le cadre de l'évaluation, car le déploiement de la bioénergie, à partir de la biomasse forestière, est possible dans les communautés autochtones (plusieurs projets sont déjà en cours). Il serait même avantageux pour celles-ci. En effet, les projets de production d'électricité, de chaleur ou de cogénération peuvent favoriser l'intégration de ces communautés dans l'économie verte du Québec et engendrer notamment des emplois durables. Cela peut également réduire leur dépendance aux énergies fossiles fortement émettrices de GES auxquelles peu de retombées économiques locales sont associées.

#### **SOC3 : Santé des populations et qualité de l'air (88 %)**

Le critère SOC3 répond bien aux principes du développement durable. Les problématiques de qualité de l'air surviennent surtout par la mauvaise opération d'une chaufferie (ex. combustible inapproprié) et l'effet de concentration des sources de polluants. Par exemple, dans un endroit où plusieurs unités de combustion seraient en activité et où, pour des raisons spécifiques (ex. topographie, vents dominants), les polluants peuvent davantage se concentrer. Ce sera la santé des personnes vulnérables qui sera plus affectée. En revanche, dans la mesure où est utilisée une chaudière de qualité avec un bon système d'épuration des gaz, et ce, conjointement à l'utilisation d'un combustible de qualité et à une bonne opération des installations, ce ne sera pas difficile de rencontrer les normes en matière de qualité de l'air à la sortie de la cheminée. À ce propos, chaque unité de combustion doit respecter les normes du RAA, ce qui constitue un filet de sécurité pour éviter les débordements. De plus, en comparant une chaudière aux copeaux ou aux granules avec des chaudières au mazout ou au charbon, on se rend compte que les émissions de polluants sont plus faibles dans le premier cas. En ce qui concerne les chaudières au gaz naturel, la biomasse forestière fait mieux dans certains cas (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> et particules) et moins bien dans d'autres (COV, HAP et CO). Dans ces conditions, la substitution des énergies fossiles pour la production de chaleur peut contribuer à réduire les émissions de polluants atmosphériques si l'opérationnalisation des chaufferies est faite de bonne façon.

#### **SOC4 : Indépendance et sécurité énergétique (88 %)**

L'évaluation du critère SOC4 est très positive. En effet, l'indépendance et la sécurité énergétique du Québec bénéficieraient grandement du développement de la filière. Cette dernière permettrait de diminuer notre dépendance aux hydrocarbures et, du même coup, de réduire notre exposition aux aléas internationaux qui peuvent faire fluctuer le prix de l'énergie et couper, à l'occasion, la chaîne d'approvisionnement. La biomasse forestière a l'avantage d'être produite à proximité des clients, à travers un circuit court, lui conférant ainsi un net avantage par rapport aux différentes formes d'énergie fossile actuellement consommées au Québec. Les retombées économiques plus importantes au sein des communautés sont une amélioration non négligeable. Elle permet également de diversifier l'arsenal énergétique du Québec, ce qui est bien vu au niveau de la résilience.

#### **ECO1: Stimulation de l'économie régionale (88 %)**

Le critère ECO1 se positionne d'une bonne façon dans les résultats de l'évaluation. Le constat : la filière de la bioénergie à partir de la biomasse forestière peut considérablement contribuer à la stimulation de l'économie des régions et à la consolidation d'une économie solidaire et sociale. Plusieurs éléments expliquent la haute note de ce critère, dont la création et le maintien d'emplois durables dans les communautés, mais aussi en raison des retombées économiques plus importantes à l'intérieur des limites du territoire québécois. Ces derniers seraient d'ailleurs plus nombreux et plus intéressants que ceux générés avec des combustibles fossiles. En effet, en ayant recours, par exemple, au mazout ou au propane, les emplois créés sont en majorité en dehors du Québec. Ceci est bien entendu économiquement moins stimulant pour la province. La filière se démarque également de l'éolien en offrant plus de travail à la population sur le court et le long terme.

#### **ECO2: Viabilité économique (74 %)**

Le critère ECO2 obtient un bon résultat en matière de développement durable. Cependant, le grand désavantage de la filière est le coût dispendieux des installations par rapport à celui relatif aux alternatives fossiles (ex. mazout). Cette considération limite donc la note pouvant être décernée à ce critère. Les coûts associés à l'immobilisation, à l'entretien et à la maintenance affectent la viabilité économique et prolongent la PRI. Tout de même, les projets de conversion à la biomasse sont financièrement intéressants après plusieurs années, car le coût du combustible est significativement plus faible et stable dans le temps. De plus, un élément majeur qui aide actuellement la filière est le financement disponible par l'entremise du Programme biomasse forestière résiduelle. Sans ce dernier, les projets de chauffage à la biomasse

forestière ne seraient pas aussi nombreux. Cette mesure est cruciale à ce stade-ci, où la filière ne fait que commencer : elle permet d'améliorer significativement la viabilité des projets.

#### **ECO3: Fiabilité de l'approvisionnement en combustible (66 %)**

Le critère ECO3 obtient une note relativement bonne dans l'évaluation. La sporadicité des projets de chauffage à la biomasse forestière est un facteur ayant contribué à la diminution de la note, car cela induit un manque de structuration de la chaîne d'approvisionnement dans certaines régions. Cependant, les volumes bruts de biomasse forestière sont amplement suffisants à l'échelle du Québec pour assurer l'approvisionnement des projets qui se développent.

#### **ECO4: L'appui financier au développement de la filière (70 %)**

Le critère ECO4 apparaît particulièrement important après avoir pris connaissance des coûts fixes élevés en matière d'entretien et d'immobilisation. Il apparaît cohérent qu'une aide financière soit disponible pour stimuler le développement de la filière. Certainement, le Québec s'est doté d'un programme qui finance les projets et cela fonctionne bien. De nombreux projets ont été réalisés un peu partout sur le territoire et ceux-ci ont un réel impact sur les émissions de GES ainsi que sur le portefeuille des propriétaires de chaufferie. C'est pourquoi la note de ce critère est bonne et que ce dernier est considéré comme compatible avec le développement durable. Cependant, certains éléments limitent la note qu'on peut lui attribuer. D'abord, le manque de compétitivité avec les programmes de financement des autres énergies renouvelables. Ensuite, le fait que ce programme n'a pas nécessairement pour effet de structurer massivement la filière en engendrant une masse significative de projets. Et enfin, sur une note plus hypothétique, le programme doit être offert en continu en début de filière. Nous avons pu voir que, dans le passé, cela n'a pas été le cas.

## **7. RECOMMANDATIONS**

Dans ce chapitre seront présentées les recommandations d'ordre environnemental, social et économique. Ces recommandations sont faites dans l'intention d'améliorer la performance de la filière énergétique en matière de développement durable.

### **7.1. Pour l'environnement**

Ici seront présentées les recommandations visant à améliorer la durabilité de la dimension environnementale associée à l'utilisation de la biomasse forestière dans un contexte bioénergétique.

#### **Recommandation 1 : Préserver des débris ligneux sur les sites de coupe**

Comme la récolte de biomasse forestière peut avoir des effets négatifs sur la biodiversité (champignons, oiseaux, petits mammifères, amphibiens et invertébrés), la qualité de l'eau, la productivité des sols et la productivité des peuplements forestiers, il est suggéré de maintenir une certaine quantité de débris ligneux sur les sites de coupe afin de maintenir les fonctions écologiques y étant associées. Les bienfaits d'une telle mesure sont soulignés par plusieurs scientifiques dans la littérature (Paré et al., 2002; Stockland, 2011; Evans, Perschel et Kittler, 2013; Thiffault et al., 2015). Il serait donc d'intérêt de laisser en forêt du bois mort, donc des débris fins et grossiers, des chicots et des arbres à vocation faunique, tels que les arbres semenciers, les arbres vivants et les arbres à cavité (Thiffault et al., 2015). D'ailleurs, selon Grinde (2020), la rétention d'arbres dispersés ou en îlots aura des effets significativement positifs sur la diversité, l'abondance et la richesse en espèces des oiseaux et des petits mammifères. Pour obtenir des lignes directrices sur le nombre de chicots ou d'arbres à vocation faunique/acre et la quantité de débris grossiers/acre à laisser sur les sites de récolte en fonction de plusieurs types de forêts, il faut consulter les documents suivants : Perschel, Evans et DeBonis (2012), Forest Guild Biomass Working Group (2010). Cependant, cette documentation ne traite pas des débris ligneux fins.

Dans ces conditions, la rétention d'arbres et de débris ligneux semble être une mesure efficace. En revanche, la science ne se prononce pas encore sur les caractéristiques du bois mort devant être laissé en forêt. Ceci est d'ailleurs particulièrement important à prendre en considération. En effet, comme cela a été démontré lors de l'analyse des enjeux environnementaux, un grand nombre d'espèces a une relation étroite avec le bois mort dans les écosystèmes forestiers. Certaines espèces de mammifères, d'oiseaux, de reptiles, d'amphibiens, d'insectes et de champignons ont des préférences bien spécifiques en ce qui concerne les caractéristiques du bois mort (ex. degré de décomposition, caractéristiques structurales,

espèce et taille) présent en forêt. Cela doit donc impérativement être pris en compte dans les lignes directrices.

### **Recommandation 2 : Éviter les sites sensibles à la récolte**

Afin de préserver les fonctions écologiques associées à la biomasse forestière sur les sites de coupe, il est recommandé d'éviter la récolte sur les sites identifiés comme sensibles à l'exportation de matière ligneuse. Les sites détenant une ou plusieurs des caractéristiques suivantes devraient donc être soustraits des pratiques de récolte :

- Sol mince;
- Pente forte;
- Sol à texture très grossière et grossière;
- Drainage excessif;
- Acide ou peu fertile. (Thiffault et al., 2015)

### **Recommandation 3 : Poursuivre la recherche pour développer nos connaissances**

Un des constats fait dans cet essai est que les connaissances scientifiques sont dans certains cas incomplètes, et ce, particulièrement au niveau des enjeux environnementaux reliés à la récolte de la biomasse forestière résiduelle. Dans ces conditions, le travail effectué par les chercheurs au Québec est indispensable afin d'améliorer la compréhension des effets d'une telle pratique sur les écosystèmes forestiers. Il faut donc mettre en place les conditions nécessaires pour assurer le bon déroulement et la continuité de leurs projets de recherche. De plus, il faut considérer leur expertise pour qu'elle guide nos actions vers la durabilité. En faisant cela, la filière continuera de se développer conjointement au respect des meilleures pratiques connues.

De plus, les effets à long terme sur plusieurs aspects environnementaux (ex. effet sur le carbone du sol) sont encore peu couverts par les recherches scientifiques. Ainsi, la science devrait se pencher davantage sur la compréhension des effets de la récolte de résidus forestiers notamment sur la productivité des sols et des peuplements dans un pareil horizon de temps. Ceci doit être fait sur plus d'une révolution et dans différentes conditions climatiques et pédologiques. (Mayer et al., 2020) La science devrait également s'efforcer d'améliorer les connaissances sur les enjeux de la biodiversité et de la qualité de l'eau. Concernant la rétention de bois mort et d'arbres en forêt, la recherche devrait s'attarder à mieux comprendre les pratiques optimales qui concernent la répartition spatiale et les caractéristiques du bois à

laisser sur les sites de coupe. De plus, la poursuite des travaux du réseau AshNet est également nécessaire afin de mieux comprendre les effets de l'épandage de cendres en forêt.

#### **Recommandation 4 : Minimiser la dette de carbone par le respect de certaines lignes directrices**

Cet essai a démontré que l'utilisation de la biomasse forestière comme source d'énergie peut participer significativement à la réduction des émissions de GES au Québec. Cependant, il a aussi été démontré qu'une multitude de facteurs vont influencer l'ampleur et la temporalité des bénéfices GES obtenus. Dans ces conditions, certaines lignes directrices doivent être respectées afin de les maximiser.

Premièrement, il faut prioriser l'utilisation des types de biomasse forestière qui procurent les bénéfices GES les plus rapides. Ainsi, l'ordre de priorité devrait être le suivant :

- 1) Court terme : Résidus de la transformation du bois, résidus CRD et résidus de coupe (biomasse forestière résiduelle);
- 2) Moyen/long terme : Biomasse forestière issue de perturbations naturelles;
- 3) Long terme : Arbres verts.

À savoir que les arbres verts sont ici considérés non intéressants pour une utilisation énergétique, et ce, en raison de leur piètre performance en matière de réduction des émissions de GES dans un horizon à court et moyen terme. En effet, le remboursement de la dette de carbone peut prendre plusieurs décennies, voire plus d'un siècle. Ainsi, les arbres verts devraient plutôt être dirigés vers la production de produits forestiers de longue durée (ex. bois d'ébénisterie et matériaux de construction), afin qu'ils séquestrent du carbone pour des dizaines d'années. Ces produits devraient aussi substituer des matériaux à forte empreinte environnementale tels que l'acier, le béton et le plastique.

De plus, il est important de mettre l'emphasis sur l'utilisation optimale des résidus de la transformation du bois et des résidus CRD. En effet, comme cette matière ligneuse se trouve déjà hors des sites forestiers, sa valorisation dans un contexte bioénergétique n'exerce pas de pression additionnelle sur la dimension environnementale (ex. biodiversité, productivité des sols), elle est donc à privilégier. Dans ces conditions, il est d'intérêt de réduire au maximum le gaspillage de tels résidus, par exemple, en les envoyant à l'enfouissement dans un LET.

Deuxièmement, il faut prioriser la substitution des énergies fossiles les plus polluantes afin de maximiser la réduction des émissions de GES des projets de valorisation énergétique à partir de biomasse. Pour ce faire, l'ordre de priorité de substitution suivant devrait être respecté :

- 1) Charbon;
- 2) Mazout lourd;
- 3) Mazout léger;
- 4) Propane;
- 5) Gaz naturel.

Troisièmement, il faut utiliser les technologies qui détiennent les meilleures efficacités de conversion énergétique. Ainsi, il faudrait prioriser la production de chaleur et la cogénération : ce sont les voies de valorisation les plus intéressantes à ce niveau actuellement. La production de biocarburants et d'électricité n'est d'ailleurs pas aussi efficace qu'eux.

Finalement, il faut également prioriser l'approvisionnement local (circuits courts) en combustible afin de limiter l'empreinte carbone reliée au transport de la matière ligneuse.

## **7.2 Pour la société**

Ici seront présentées les recommandations visant à améliorer la durabilité de la dimension sociale associée à l'utilisation de la biomasse forestière dans un contexte bioénergétique.

### **Recommandation 5 : Informer, sensibiliser et éduquer la population à la filière énergétique**

Il est recommandé d'informer, de sensibiliser et d'éduquer la population aux différents enjeux, avantages et pratiques/technicités (procédés de récolte, type de biomasse utilisé, méthodes de valorisation, etc.) de la filière de la biomasse forestière. En effet, il semblerait que les perceptions négatives face à cette ressource chez une partie de la population soient davantage engendrées par une mauvaise compréhension de ce qu'est réellement la biomasse forestière et comment elle est utilisée au Québec. La ressource a eu mauvaise presse à bien des occasions durant les dernières années, certaines analyses ont eu un grand impact sur l'opinion populaire et elles n'étaient pas toujours très nuancées. Certaines notions complexes, par exemple celle de la carboneutralité, peuvent être mal comprises, et avec raison. Il serait donc d'intérêt de vulgariser ces notions et de diffuser la bonne information en échangeant avec le public. Cela aurait également pour effet d'améliorer l'acceptabilité sociale.

#### **Recommandation 6 : Réaliser une cartographie fine des zones sensibles à la qualité de l'air**

En partant du principe selon lequel les systèmes de combustion à la biomasse forestière peuvent avoir un impact variable sur la qualité de l'air, il importe de cibler les zones considérées comme plus sensibles. Bien que les technologies modernes permettent de minimiser les émissions atmosphériques de tels systèmes, en fonction du contexte local cette pratique peut, à sa façon, affecter la qualité de l'air. Cette recommandation suggère donc de procéder à la réalisation d'une cartographie des zones sensibles à la qualité de l'air afin de guider le développement de la filière du bois-énergie sur le territoire québécois. Ce travail pourrait être effectué par l'utilisation conjointe de l'analyse spatiale multicritère et des outils de systèmes d'informations géographiques (SIG). Cette démarche permettrait de prendre en considération une multitude de critères d'intérêt, comme les vents dominants, la présence d'industries polluantes, la topographie, la répartition des habitations résidentielles et les zones où des problèmes de pollution de l'air sont déjà existants. Les résultats de l'analyse spatiale conduiraient à une prise de décision plus éclairée quant aux localités plus favorables à l'implantation de chaufferies à la biomasse forestière.

#### **Recommandation 7 : Promouvoir les avantages au niveau de la sécurité énergétique**

La recommandation suivante vise la promotion, auprès des principaux intéressés, des avantages de la biomasse forestière pour la production de chaleur en ce qui concerne la sécurité énergétique. En effet, cet essai a exposé les gains obtenus en matière de sécurité des approvisionnements lorsqu'un projet de conversion à la biomasse forestière se réalise. Ainsi, il faut, par exemple, sensibiliser le secteur agricole et l'industrie agroalimentaire à cet effet. Ceux-ci sont encore fortement dépendants du propane dans leurs activités et donc soumis aux aléas des marchés internationaux. De plus, ces secteurs représentent un potentiel de substitution (1 596 GWh) très intéressant qu'il serait possible d'aller chercher par l'application de cette mesure.

### **7.3 Pour l'économie**

Ici seront présentées les recommandations visant à améliorer la durabilité de la dimension économique associée à l'utilisation de la biomasse forestière dans un contexte bioénergétique.

#### **Recommandation 8 : Poursuivre l'appui financier en continu des projets de conversion en début de filière**

Dans cet essai, l'appui financier a été considéré comme une mesure de première nécessité pour le bon développement de la filière au Québec. Il est donc recommandé de maintenir le Programme biomasse



forestière résiduelle afin de lancer et de structurer la filière naissante. Le financement doit être continu à court et à moyen terme afin que les acteurs (opérateurs, vendeurs de chaudières, etc.), notamment, puissent se mettre en place et perdurer dans le temps.

#### **Recommandation 9 : Favoriser l'atteinte d'une masse critique de projets**

À la lumière de l'analyse des enjeux, le développement d'une masse critique de projets distribués sur l'ensemble du territoire de la province semble être incontournable pour la structuration de la filière. En effet, cette mesure est nécessaire dans plusieurs régions où le nombre de projets est encore trop faible pour favoriser le développement d'une expertise et la mise en place d'une chaîne d'approvisionnement solide en combustible. Le présent essai a mis en lumière le potentiel de substitution du Québec, il faut simplement mettre les conditions propices à son exploitation.

Avec un potentiel de substitution intéressant de 1 064 GWh dans les bâtiments institutionnels, le gouvernement pourrait faire figure de proue en amorçant la conversion des installations de chauffage dans une quantité appréciable d'institutions. Cela aurait pour effet de progresser vers l'atteinte de la masse critique et de stimuler l'inauguration de plusieurs autres projets en dehors du domaine public.

Pour Bourque, Laplante, L'Italien et Fagoaga (2017), l'atteinte d'une masse critique de projets est également indispensable pour structurer la filière et permettre son essor. Selon eux, pour y arriver, il faut dégager des moyens financiers et institutionnels qui nous feraient progresser dans cette voie. À ce propos, ils considèrent important la mise en place d'une politique industrielle qui fixerait des cibles en matière de conversion énergétique dans les milieux commercial, industriel et institutionnel.

#### **Recommandation 10 : Remettre à 75 % l'aide financière du Programme biomasse forestière résiduelle**

Il est suggéré d'augmenter de 25 % l'aide financière offerte par le Programme biomasse forestière résiduelle, et ce, pour qu'elle couvre 75 % des coûts associés aux projets. Cette mesure permettrait d'annuler la concurrence avec les programmes concurrents, qui eux, offrent un financement de 75 % pour d'autres types d'énergies renouvelables tels que le solaire, l'éolien et la géothermie. La filière serait à ce niveau moins désavantagée.

#### **Recommandation 11 : Poursuivre le développement des CTCB**

Il est recommandé de poursuivre la mise en place de centres de transformation et de conditionnement de la biomasse forestière sur le territoire. Cela permettra notamment de garantir l'approvisionnement en

biomasse forestière, d'offrir un combustible de qualité qui répond aux exigences de la clientèle et d'améliorer le rapport qualité/prix (FQCF, s. d.).

#### **7.4 Recommandation générale**

Ici sera présentée une recommandation visant à améliorer la durabilité générale de l'utilisation de la biomasse forestière dans un contexte bioénergétique. En effet, elle a une incidence sur les trois dimensions du développement durable.

##### **Recommandation 12 : Mettre en place un programme de formation pour les opérateurs de chaufferie**

La mise en œuvre d'un programme de formation disponible aux opérateurs de chaufferie serait opportune. Les lacunes qu'il est possible d'observer dans les connaissances de certains opérateurs confirment la nécessité d'une telle mesure. L'objectif d'une telle formation devrait être d'enseigner les technicités en lien avec l'entretien, la maintenance et l'opération des chaudières à la biomasse afin de maximiser la durée de vie de l'unité de combustion ainsi que son efficacité en termes de rendement énergétique et de réduction de la pollution de l'air. Les principes de base relatifs à la combustion de la biomasse forestière et à l'acquisition puis l'entreposage du combustible devraient également être abordés. Ultimement, la formation permettrait de réduire au minimum les coûts associés à l'exploitation et à l'entretien des installations, tout comme le risque d'accident malencontreux (ex. blessure et feu). Elle permettrait aussi de prévenir le dérapage des projets de conversion à la biomasse forestière pouvant être provoqué par une mauvaise gestion de l'appareil de combustion. Ce type d'évènement peut malheureusement être défavorable pour l'image de la filière. Dans ces conditions, l'application de cette recommandation améliorerait la viabilité économique des projets ainsi que les performances environnementales, notamment en ce qui concerne les émissions atmosphériques.

## CONCLUSION

Dans le contexte climatique actuel, la diminution de notre dépendance aux énergies fossiles ainsi que la réduction de nos émissions de GES sont un passage obligé. Au Québec, comme l'énergie consommée provient en majorité (56 %) de ressources conventionnelles (produits pétroliers raffinés, gaz naturel, liquide de gaz naturel et charbon) et que le secteur énergétique est responsable de la très grande majorité des émissions de GES (71 %), il est donc évident que la décarbonation de ce secteur doit se poursuivre, particulièrement en considérant que le Québec doit diminuer ses émissions de GES de 37,5 % d'ici 2030, par rapport aux mesures de 1990. Alors que les énergies renouvelables représentent une solution efficace pour y arriver, l'objectif principal de cet essai était d'analyser l'utilisation de la biomasse forestière comme source d'énergie afin d'évaluer son intérêt dans une perspective de réduction des émissions de GES et de développement durable au Québec. C'est plutôt la filière de la production de chaleur qui a été analysée en raison de la haute efficacité de conversion des technologies qui y sont reliées et de son développement croissant sur le territoire.

Les objectifs spécifiques fixés dans le cadre de ce projet de fin d'études ont tous été atteints. Ainsi, l'essai a d'abord permis de faire un état de la situation détaillé de la biomasse forestière au Québec en mettant en lumière les différentes sources d'approvisionnement et leur potentiel respectif, les étapes de la chaîne d'approvisionnement ainsi que les diverses voies de valorisation énergétique. Sur ce dernier point, il a été vu que la production de chaleur par combustion directe a une longueur d'avance en ce qui concerne l'efficacité de conversion des technologies disponibles. Ensuite, en examinant le rôle que peut occuper la biomasse forestière dans la mitigation des changements climatiques, il a été conclu que cette ressource renouvelable peut engendrer des bénéfices GES lors de son utilisation énergétique, et ce, intrinsèquement parce qu'elle fait partie du cycle court du carbone biogénique. De plus, à la suite de l'analyse du débat en cours dans le milieu scientifique concernant la carboneutralité de la biomasse forestière, il a été conclu que la divergence des opinions est principalement occasionnée par la grande variabilité des méthodologies utilisées pour étudier la question. Après cette analyse, l'essai considère que la biomasse forestière n'est pas une source d'énergie carboneutre, bien qu'elle puisse le devenir à court, moyen ou long terme en fonction des caractéristiques du scénario de bioénergie et du scénario de référence. Cependant, l'absence d'une carboneutralité immédiate au moment de la combustion du bois ne change en rien l'intérêt de développer cette filière. Il faut simplement favoriser la minimalisation de la dette de carbone pour maximiser les dividendes. À la suite de cela, l'analyse des enjeux environnementaux, sociaux et économiques reliés à l'utilisation de la biomasse forestière comme source d'énergie a permis de mettre

les bases pour appliquer la GADD développée par l'UQAC et adaptée selon les besoins de l'essai. Les résultats obtenus avec la grille d'analyse positionnent la filière d'une bonne façon par rapport au développement durable et au respect de ses principes. Le résultat global pour l'ensemble des dimensions est de 70 %, ce qui est positif sur le plan de la durabilité. Les résultats pour les dimensions environnementale, sociale et économique sont : 62 %, 74 % et 73 % respectivement. Chacune de ces dimensions se situe au-dessus du seuil de durabilité établi à 60 % dans le cadre de cet essai. L'interprétation des résultats pour les enjeux environnementaux doit se faire en prenant en considération qu'à plusieurs reprises le principe de précaution a été appliqué en raison de l'incomplétude des connaissances scientifiques. Dans ces cas précis, une évaluation plus conservatrice était réalisée.

Succinctement, le présent essai conclut que la production de chaleur à partir de la biomasse forestière a certainement un rôle important à jouer dans la réduction des émissions de GES au Québec. Il est d'ailleurs juste d'affirmer que le développement de cette filière peut également se faire en accord avec le développement durable. Bien entendu, il est fondamental que ce développement soit fait dans le respect de certaines lignes directrices afin d'éviter que la durabilité soit affectée et que les bénéfices environnementaux soient réduits. À ce propos, il est nécessaire de prendre en considération les recommandations du présent essai.

Enfin, il serait intéressant d'appliquer la GADD dans le cadre d'une nouvelle analyse afin d'évaluer les enjeux du développement durable relatifs à la production de biocarburants de deuxième génération, et ce, toujours dans un contexte québécois.

## RÉFÉRENCES

- Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME). (2007). *Les émissions atmosphériques de la combustion de biomasse*. Repéré à [http://www.bois-energie.ofme.org/documents/Environnement/etude\\_ademe\\_emission\\_atmo6\\_07\\_2007.pdf](http://www.bois-energie.ofme.org/documents/Environnement/etude_ademe_emission_atmo6_07_2007.pdf)
- Amiel, J., Brusset, H. (s. d.). *Le carbone*. Repéré à <http://www.universalis-edu.com/encyclopedia/carbone/>
- Angers, V. A. (2009). *L'enjeu écologique du bois mort : Complément au Guide pour la description des principaux enjeux écologiques dans les plans régionaux de développement intégré des ressources et du territoire*. Repéré à <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/amenagement/enjeu-bois-mort.pdf>
- Association québécoise de la production d'énergie renouvelable (AQPER). (s. d.). *La biomasse : technologie*. Repéré à <https://aqper.com/fr/technologie-2>
- Batellier, P. (2015). Acceptabilité sociale : cartographie d'une notion et de ses usages. Repéré à [http://www.espace-ressources.uqam.ca/images/Documents/Recherche/Rapports\\_recherche/Batellier-2015-Acceptabilite-sociale.pdf](http://www.espace-ressources.uqam.ca/images/Documents/Recherche/Rapports_recherche/Batellier-2015-Acceptabilite-sociale.pdf)
- Bergeron, Y., Cyr, D., Girardin, M. P. et Carcaillet, C. (2011). Will climate change drive 21st century burn rates in Canadian boreal forest outside of its natural variability: collating global climate model experiments with sedimentary charcoal data. *International Journal of Wildland Fire*, 19(8), 1127-1139. Repéré à <https://www.publish.csiro.au/wf/WF09092>
- Berndes, G., Abt, B., Asikainen, A., Cowie, A., Dale, V., Egnell, G. et Yeh, S. (2016). Forest biomass, carbon neutrality and climate change mitigation. From science to policy, 3, 3-27. Repéré à [https://efi.int/sites/default/files/files/publication-bank/2018/efi\\_fstp\\_3\\_2016.pdf](https://efi.int/sites/default/files/files/publication-bank/2018/efi_fstp_3_2016.pdf)
- Bernier, P., Paré, D., Thiffault, E., Beauregard, R., Bouthillier, L., Levasseur, A. et Saint-Laurent-Samuel, A. (2012). *Avis scientifique : L'utilisation de la biomasse forestière pour réduire les émissions de gaz à effet de serre du Québec*. Repéré à <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/biomasse-reduction-emission.pdf>
- Berteaux, D. (2014). *Changements climatiques et biodiversité du Québec: vers un nouveau patrimoine naturel*. Québec, Québec, Canada : Presses de l'Université du Québec.
- Bird, D. N., Pena, N., Frieden, D. et Zanchi, G. (2012). Zero, one, or in between: evaluation of alternative national and entity-level accounting for bioenergy. *Global Change Biology Bioenergy*, 4(5), 576-587. Repéré à <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1757-1707.2011.01137.x>
- Bliefert, C. et Perraud, R. (2009). *Chimie de l'environnement: air, eau, sols, déchets* (2<sup>e</sup> éd.). Bruxelles, Belgique : Groupe De Boeck.
- Bonan, G. (2008). *Ecological climatology: concepts and applications* (2<sup>e</sup> ed.). Cambridge, Royaume-Uni : Cambridge University Press.
- Bonan, G. B. (2008). Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320(5882), 1444-1449. Repéré à [https://science.sciencemag.org/content/320/5882/1444?casa\\_token=aHzRNPYiFBEAAAAA:My4kh0Qjh1TpeuQIKH5dN9XGu3B307DjjEyz7oKTgJTSMh03kbCQ1VjJQbsJld-DRE9Tlo2jX2KvYw](https://science.sciencemag.org/content/320/5882/1444?casa_token=aHzRNPYiFBEAAAAA:My4kh0Qjh1TpeuQIKH5dN9XGu3B307DjjEyz7oKTgJTSMh03kbCQ1VjJQbsJld-DRE9Tlo2jX2KvYw)

- Bonneuil, C. et Fressoz, J. B. (2013). *L'événement Anthropocène: la Terre, l'histoire et nous*. Repéré à <https://journals-openedition-org.ezproxy.usherbrooke.ca/developpementdurable/10484>
- Boué, C. (2018). *L'impact des récoltes de la biomasse forestière sur la composition et la diversité des champignons dans les souches résiduelles*. (Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec, Canada). Repéré à <https://archipel.uqam.ca/11954/1/M15725.pdf>
- Boukherroub, T., LeBel, L., et Lemieux, S. (2015). *Vers la valorisation de la biomasse forestière dans l'Est canadien: une étude de cas au Québec*. Repéré à [https://www.researchgate.net/publication/283420829\\_Vers\\_la\\_valorisation\\_de\\_la\\_biomasse\\_forestiere\\_dans\\_l'Est\\_canadien\\_une\\_etude\\_de\\_cas\\_au\\_Quebec](https://www.researchgate.net/publication/283420829_Vers_la_valorisation_de_la_biomasse_forestiere_dans_l'Est_canadien_une_etude_de_cas_au_Quebec)
- Boulanger, Y., Gauthier, S., Gray, D. R., Le Goff, H., Lefort, P. et Morissette, J. (2013). Fire regime zonation under current and future climate over eastern Canada. *Ecological applications*, 23(4), 904-923. Repéré à <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1890/12-0698.1>
- Bourque, G. L., Laplante, R., L'Italien, F. et Fagoaga, N. (2017). *Transition du secteur énergétique: amorcer une rupture*. Repéré à [https://irec.quebec/ressources/publications/Rapport\\_IREC\\_janvier2017.pdf](https://irec.quebec/ressources/publications/Rapport_IREC_janvier2017.pdf)
- Bourque, P-A. (2010a). *Les grands cycles biogéochimiques et les changements climatiques*. Repéré à <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/cycles.biogeochemiques.html>
- Bourque, P-A. (2010b). *Le cycle du carbone*. Repéré à <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/cycle.carbone.html>
- Bourque, P-A. (2010c). *Le cycle du phosphore*. Repéré à <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/cycle.phosphore.html>
- Brais, S., Paré, D., Camiré, C., Rochon, P. et Vasseur, C. (2002). Nitrogen net mineralization and dynamics following whole-tree harvesting and winter windrowing on clayey sites of northwestern Quebec. *Forest Ecology and Management*, 157(1-3), 119-130. Repéré à [https://www-sciencedirect-com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/pii/S0378112700006435?casa\\_token=bqpSI\\_QHACsAAAA:GvJOqGfBSmgUNB036BFFIxaDtOG5dRwfawuuetGfdT1G9yWaG8n\\_8u3jWTcZKaQ7l-J4Qwd7yQ](https://www-sciencedirect-com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/pii/S0378112700006435?casa_token=bqpSI_QHACsAAAA:GvJOqGfBSmgUNB036BFFIxaDtOG5dRwfawuuetGfdT1G9yWaG8n_8u3jWTcZKaQ7l-J4Qwd7yQ)
- Brandtberg et Olsson, B. A. (2012). Changes in the effects of whole-tree harvesting on soil chemistry during 10 years of stand development. *Forest Ecology and Management*, 277, 150-162. Repéré à [https://www-sciencedirect-com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/pii/S0378112712002289?casa\\_token=NhYJEQtOh6oAAAA:eakMDWiJR0tPisHW4E0RytD1cq3\\_4e5DU6tQY83jICX\\_IPO0GupVqCW9PQGySxKQQPstnkqpiw](https://www-sciencedirect-com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/pii/S0378112712002289?casa_token=NhYJEQtOh6oAAAA:eakMDWiJR0tPisHW4E0RytD1cq3_4e5DU6tQY83jICX_IPO0GupVqCW9PQGySxKQQPstnkqpiw)
- Brooks, R. T. (1999). Residual effects of thinning and high white-tailed deer densities on northern redback salamanders in southern New England oak forests. *The Journal of wildlife management*, 1172-1180. Repéré à <https://www-jstor-org.ezproxy.usherbrooke.ca/stable/pdf/3802835.pdf?refreqid=excelsior%3A468d677afc45823cba370263a0bfa049>
- Brooks, T. M., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., Da Fonseca, G. A., Rylands, A. B., Konstant, W. R.,...Hilton-Taylor, C. (2002). Habitat loss and extinction in the hotspots of biodiversity.

- Conservation biology*, 16(4), 909-923. Repéré à <https://conbio.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1046/j.1523-1739.2002.00530.x>
- Buchholz, T., Hurteau, M. D., Gunn, J. et Saah D. (2016) A global meta-analysis of forest bioenergy greenhouse gas emission accounting studies. *Global Change Biology Bioenergy*, 8(2), 281-289. Repéré à <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcbb.12245>
- Bureau de promotion des produits du bois du Québec (QWEB). (s. d.). *Granules de bois*. Repéré à <https://quebecwoodexport.com/produits/granules-de-bois/>
- Bureau du forestier en chef. (2013). *Perturbations naturelles*. Repéré à [https://forestierenchef.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2013/01/029-39\\_MDPF\\_PerturbationsNat1.pdf](https://forestierenchef.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2013/01/029-39_MDPF_PerturbationsNat1.pdf)
- Bureau du forestier en chef. (2017). *Estimation des quantités récoltables de biomasse forestière dans les forêts du domaine de l'État à compter du 1er avril 2018*. Repéré à <https://forestierenchef.gouv.qc.ca/actualite/if-du-canada-et-biomasse-forestiere-nouvelle-evaluation-des-quantites-recoltables/>
- Bureau du forestier en chef. (2019). *Détermination 2018-2023 : synthèse provinciale*. Repéré à <https://forestierenchef.gouv.qc.ca/documents/calcul-des-possibilites-forestieres/periode-2018-2023/possibilites-forestieres-2018-2023/>
- Bureau du forestier en chef. (2020). *Calcul de la possibilité forestière*. Repéré à <https://forestierenchef.gouv.qc.ca/documents/calcul-des-possibilites-forestieres/>
- Butin, H. et Kowalski, T. (1983). The natural pruning of branches and their biological conditions. 2. The fungal flora of English oak (*Quercus robur* L.). *European Journal of Forest Pathology*, 13(7), 428-439. Repéré à <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1439-0329.1983.tb00145.x>
- Buttle, J. et Murray, C. (2011). *Hydrological implication of forest biomass use* (Rapport final). Repéré à <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.476.9841&rep=rep1&type=pdf>
- Butts, S. R., et McComb, W. C. (2000). Associations of forest-floor vertebrates with coarse woody debris in managed forests of western Oregon. *The Journal of wildlife management*, 95-104. Repéré à <https://www-jstor-org.ezproxy.usherbrooke.ca/stable/pdf/3802978.pdf?refreqid=excelsior%3Af4aaa1a70bf98b50490a06edfbc0ceb1>
- Carbone boréal. (s. d.). *Calculateur GES*. Repéré à <http://carboneboreal.uqac.ca/calculateur-ges-fr/>
- Chapin III, F. S., Matson, P. A. et Vitousek, P. (2012). *Principles of terrestrial ecosystem ecology* (2<sup>e</sup> éd.). New York, États-Unis : Springer Science & Business Media.
- Cheikh, B. (2018). *Conception de la chaîne logistique des bioraffineries forestières intégrées et vertes* (Thèse de doctorat, Université de Montréal, Montréal, Québec, Canada). Repéré à [https://publications.polymtl.ca/3287/1/2018\\_SourourBenCheikh.pdf](https://publications.polymtl.ca/3287/1/2018_SourourBenCheikh.pdf)
- Cherubini, F., Peters, G. P., Berntsen, T., Strømman, A. H. et Hertwich, E. (2011). CO<sub>2</sub> emissions from biomass combustion for bioenergy: atmospheric decay and contribution to global warming. *Global Change Biology Bioenergy*, 3(5), 413-426. Repéré à <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1757-1707.2011.01102.x>

- Christopherson, W. R. et Birkeland, G. (2015). *Geosystems: An Introduction to Physical Geography* (9<sup>e</sup> ed.). Upper Saddle River, New Jersey, États-Unis : Pearson.
- Comité de concertation et de valorisation du bassin de la rivière Richelieu (COVABAR). (s. d.). *Sédimentation et envasement des cours d'eau*. Repéré à <https://covabar.qc.ca/plan-directeur-eau/diagnostic/problemes-associes-dynamique-cours-eau/sedimentation-et-ensavement-des-cours-eau/>
- Conseil canadien des ministres des forêts. (s. d.a). *La bioénergie issue des forêts canadiennes*. Repéré à [https://www.sfmcanada.org/images/Publications/FR/Bioenergy\\_FR.pdf](https://www.sfmcanada.org/images/Publications/FR/Bioenergy_FR.pdf)
- Conseil canadien des ministres des forêts. (s. d.b). Canada's forests: CO<sub>2</sub> sink or source?. Repéré à [https://www.sfmcanada.org/images/Publications/EN/CO2\\_Sink\\_EN.pdf](https://www.sfmcanada.org/images/Publications/EN/CO2_Sink_EN.pdf)
- Conseil de l'industrie forestière du Québec (CIFQ). (2017). *Rapport sur le développement durable de l'industrie forestière du Québec*. Repéré à <http://www.cifq.com/documents/file/Publications/Rapport%20DD/qd4945-cifq-bilandeveloppementdurable-12dec2017-hr.pdf>
- Conseil Patronal de l'Environnement du Québec (CPEQ). (2012). Guide de bonnes pratiques afin de favoriser l'acceptabilité sociale des projets. Repéré à [https://www.cpeq.org/files/guides/guide\\_bonnespratiques\\_web.pdf](https://www.cpeq.org/files/guides/guide_bonnespratiques_web.pdf)
- Croke, J. C. et Hairsine, P. B. (2006). Sediment delivery in managed forests: a review. *Environmental Reviews*, 14(1), 59-87. Repéré à <https://www.nrcresearchpress.com/doi/pdf/10.1139/a05-016>
- Cruikshank, W., Robert, J. et Silversides, C. (2014). *L'énergie de la biomasse*. Repéré à <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/lenergie-de-la-biomasse>
- Del Degan, Massé et Associés inc. (DDM). (2012). *Structure de l'industrie de la récupération du bois provenant de la construction, de la rénovation et de la démolition au Québec* (Rapport final). Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/structure-industrie-bois-crd.pdf>
- Demirbaş, A. (2001). Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy conversion and Management*, 42(11), 1357-1378. Repéré à [https://www.sciencedirect.com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/pii/S0196890400001370?casa\\_token=s\\_6OuEIN59A:AAAA:AtHX-EpAasZ1FaC3Q34GSRZ7GEIzzGaCHJltaSBgPQGernk0qNGNC6rU53QVGtR1SeomnM0T9A](https://www.sciencedirect.com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/pii/S0196890400001370?casa_token=s_6OuEIN59A:AAAA:AtHX-EpAasZ1FaC3Q34GSRZ7GEIzzGaCHJltaSBgPQGernk0qNGNC6rU53QVGtR1SeomnM0T9A)
- Demirbas, A. (2005). Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Progress in energy and combustion science*, 31(2), 171-192. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128505000055>
- Dixon, R. K., Solomon, A. M., Brown, S., Houghton, R. A., Trexler, M. C. et Wisniewski, J. (1994). Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 263(5144), 185-190. Repéré à [https://science.sciencemag.org/content/263/5144/185?casa\\_token=Rj1C8IaitGAAAAA:kcEK9qvIpi8IZDbtH6pslNCarb05-BshPoU7kB8MnYQwiWVnOya3P-kf-Ha6trvrnmknNujhOJw7aIQ](https://science.sciencemag.org/content/263/5144/185?casa_token=Rj1C8IaitGAAAAA:kcEK9qvIpi8IZDbtH6pslNCarb05-BshPoU7kB8MnYQwiWVnOya3P-kf-Ha6trvrnmknNujhOJw7aIQ)
- Domac, J., Richards, K. et Risovic, S. (2005). Socio-economic drivers in implementing bioenergy projects. *Biomass and bioenergy*, 28(2), 97-106. Repéré à <https://www.sciencedirect->



com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/pii/S0961953404001485?casa\_token=ZZwJlYLSukIA  
AAAA:e-5Dn\_ui-ticaf9GUz5-J\_sdIJlNyDqbOm5DqMc\_IW8Vhf5W\_0o-6EAnGgVY7FU5BDOKhZkT-A

Dufour, A. (2016). *Thermochemical conversion of biomass for the production of energy and chemicals*.

EcoTec. (2012). *Évaluation économique de la filière de la biomasse forestière destinée aux projets de chaufferies* (Rapport final). Repéré à [https://visionbiomassequebec.org/wp-content/uploads/2019/07/Chauffage\\_biomasse\\_CI\\_FQCF\\_2012\\_03\\_12.pdf](https://visionbiomassequebec.org/wp-content/uploads/2019/07/Chauffage_biomasse_CI_FQCF_2012_03_12.pdf)

Edward, M., Smeets, W. et Faaij, A. P. C. (2007). Bioenergy potentials from forestry in 2050: An assessment of the drivers that determine potentials. *Climatic Change*, 81, 353-390. Repéré à <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs10584-006-9163-x.pdf>

Elliot, W. J. (2010). Effects of forest biomass use on watershed processes in the western United States. *Western Journal of Applied Forestry*, 25(1), 12-17. Repéré à <https://academic.oup.com/wjaf/article/25/1/12/4683574>

Eloutassi, N., Louaste, B., Boudine, L., et Remmal, A. (2014). Valorisation de la biomasse lignocellulosique pour la production de bioéthanol de deuxième génération. *Revue des Énergies Renouvelables*, 17(4), 600-609. Repéré à [https://www.cder.dz/vlib/revue/pdf/v017\\_n4\\_texte\\_9.pdf](https://www.cder.dz/vlib/revue/pdf/v017_n4_texte_9.pdf)

Emilson, C., Hannam, K., Aubin, I., Basiliko, N., Belanger, S., Brais, N.,...Diochon, A. (2018). *Synthesis of Current AshNet Study Designs and Methods with Recommendations Towards a Standardized Protocol*. Repéré à [https://www.researchgate.net/profile/Caroline\\_Emilson/publication/328744185\\_Synthesis\\_of\\_Current\\_AshNet\\_Study\\_Designs\\_and\\_Methods\\_with\\_Recommendations\\_towards\\_a\\_Standardized\\_Protocol/links/5be0618f299bf1124fbccdef/Synthesis-of-Current-AshNet-Study-Designs-and-Methods-with-Recommendations-towards-a-Standardized-Protocol.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Caroline_Emilson/publication/328744185_Synthesis_of_Current_AshNet_Study_Designs_and_Methods_with_Recommendations_towards_a_Standardized_Protocol/links/5be0618f299bf1124fbccdef/Synthesis-of-Current-AshNet-Study-Designs-and-Methods-with-Recommendations-towards-a-Standardized-Protocol.pdf)

Environmental protection agency (EPA). (2018). EPA's Treatment of Biogenic Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) Emissions from Stationary Sources that Use Forest Biomass for Energy Production. Repéré à [https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-04/documents/biomass\\_policy\\_statement\\_2018\\_04\\_23.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-04/documents/biomass_policy_statement_2018_04_23.pdf)

Erni, S. (2016). *Régulation des régimes de feux dans la forêt boréale de la Baie James* (Thèse de doctorat, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique Québec (Doctoral dissertation, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Québec, Canada). Repéré à <http://espace.inrs.ca/4892/>

ESIM. (2013). *La BIOMASSE, Richesse énergétique d'avenir pour le Québec et les TECHNOLOGIES PERFORMANTES du chauffage automatique*. Repéré à [https://mern.gouv.qc.ca/energie/politique/memoires/20131010\\_314\\_ESIM\\_Solutions\\_Chauffage\\_Ecologiques\\_M.pdf](https://mern.gouv.qc.ca/energie/politique/memoires/20131010_314_ESIM_Solutions_Chauffage_Ecologiques_M.pdf)

Etcheverry, P., Ouellet, J. P. et Crête, M. (2005). Response of small mammals to clear-cutting and precommercial thinning in mixed forests of southeastern Quebec. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(12), 2813-2822. Repéré à <https://www.nrcresearchpress.com/doi/pdf/10.1139/x05-208>

Evans, A. M., Perschel, R. T. et Kittler, B. A. (2013). Overview of forest biomass harvesting guidelines. *Journal of sustainable forestry*, 32(1-2), 89-107. Repéré à [https://www.tandfonline-com.ezproxy.usherbrooke.ca/doi/full/10.1080/10549811.2011.651786?casa\\_token=ypyApfyc2P](https://www.tandfonline-com.ezproxy.usherbrooke.ca/doi/full/10.1080/10549811.2011.651786?casa_token=ypyApfyc2P)

kAAAAA%3A7YzVZ5s83ps\_tUzrOIFThuyWRtnfeyr932woZ5rGDm-  
CYkWyZXkbgPL6ShpoZ\_pQE9mgJNLH4gi&

Fargione, J., Hill, J., Tilman, D., Polasky, S. et Hawthorne, P. (2008). Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science*, 319(5867), 1235-1238.

Fédération des producteurs forestiers du Québec (FPFQ). (2019). *La forêt privée chiffrée*. Repéré à <https://www.foretprivee.ca/wp-content/uploads/2019/08/La-foret-privee-chiffree-2019-08.pdf>

Fédération québécoise des coopératives forestières (FQCF). (2013). *Filière de la biomasse destinée à la production de chaleur : Plan directeur de la Fédération québécoise des coopératives forestières*. Repéré à [https://www.fqcf.coop/wp-content/uploads/Plan\\_directeur.pdf](https://www.fqcf.coop/wp-content/uploads/Plan_directeur.pdf)

Fédération québécoise des coopératives forestières (FQCF). (2018). *Chauffage à la biomasse forestière*. Repéré à [https://crelaurentides.org/images/images\\_site/evenements/changements\\_climatiques/2018/20180207\\_biomasse.pdf](https://crelaurentides.org/images/images_site/evenements/changements_climatiques/2018/20180207_biomasse.pdf)

Fédération québécoise des coopératives forestières (FQCF). (s. d.). *Les coopératives forestières : spécialistes de l'approvisionnement en biomasse forestière*. Repéré à [https://fqcf.coop/wp-content/uploads/specialistes\\_de\\_l\\_approvisionnement\\_en\\_biomasse\\_forestiery.pdf](https://fqcf.coop/wp-content/uploads/specialistes_de_l_approvisionnement_en_biomasse_forestiery.pdf)

Fleming, R. L., Powers, R. F., Foster, N. W., Kranabetter, J. M., Scott, D. A., Ponder Jr, F.,...Morris, D. M. (2006). Effects of organic matter removal, soil compaction, and vegetation control on 5-year seedling performance: a regional comparison of Long-Term Soil Productivity sites. *Canadian Journal of Forest Research*, 36(3), 529-550. Repéré à <https://www.nrcresearchpress.com/doi/pdf/10.1139/x05-271>

Forest Guild Biomass Working Group. (2010). *Forest biomass retention and harvesting guidelines for the Northeast*. Repéré à [https://newenglandcottontail.org/sites/default/files/research\\_documents/Forest%20Biomass%20Retention%20and%20Harvesting%20Guidelines.pdf](https://newenglandcottontail.org/sites/default/files/research_documents/Forest%20Biomass%20Retention%20and%20Harvesting%20Guidelines.pdf)

Fortin, M. J. et Fournis, Y. (2014). Vers une définition ascendante de l'acceptabilité sociale: les dynamiques territoriales face aux projets énergétiques au Québec. *Natures Sciences Sociétés*, 22(3), 231-239. Repéré à <https://www.cairn.info/revue-natures-sciences-societes-2014-3-page-231.htm>

Fournier, J. (2019, 12 octobre). Chauffage à la biomasse : le cas de l'hôpital d'Amqui. *Le Soleil*. Repéré à <https://www.lesoleil.com/zone/zone-une-foret-a-connaître/chauffage-a-la-biomasse-le-cas-de-lhopital-damqui-198df4dbce1b7e59687cd743a1ff42d4>

Frigon, M. (2013). *Chauffer un hôpital avec des houppiers*. Repéré à <https://www.operationsforestieres.ca/chauffer-un-hopital-avec-des-houppiers-951/>

Fritts, S. R., Moorman, C. E., Grodsky, S. M., Hazel, D. W., Homyack, J. A., Farrell, C. B.,...Greene, D. U. (2017). Rodent response to harvesting woody biomass for bioenergy production. *The Journal of Wildlife Management*, 81(7), 1170-1178. Repéré à <https://wildlife-onlinelibrary-wiley-com.ezproxy.usherbrooke.ca/doi/pdfdirect/10.1002/jwmg.21301>

Fritts, S., Moorman, C., Grodsky, S., Hazel, D., Homyack, J., Farrell, C. et Castleberry, S. (2016). Do biomass harvesting guidelines influence herpetofauna following harvests of logging residues for

- renewable energy?. *Ecological Applications*, 26(3), 926-939. Repéré à <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1890/14-2078>
- Gagné, E. (2013). L'approvisionnement en biomasse forestière. *Vecteur Environnement*, 46(4), 22-24. Repéré à <https://search.proquest.com/docview/1444652896/6EE99BAA24E94266PQ/1?accountid=13835>
- Gagnon, D. (2004). *La forêt naturelle du Québec, un survol* (Rapport préparé pour la Commission d'étude sur la gestion de la forêt publique québécoise). Repéré à [https://www.bibliotheque.assnat.qc.ca/depotnumerique\\_v2/affichagenotice.aspx?idn=9634](https://www.bibliotheque.assnat.qc.ca/depotnumerique_v2/affichagenotice.aspx?idn=9634)
- Galik, C. S., et Abt, R. C. (2012). The effect of assessment scale and metric selection on the greenhouse gas benefits of woody biomass. *Biomass and Bioenergy*, 44, 1-7. Repéré à [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953412001808?casa\\_token=qWKex-2pRI8AAAAA:TxkbPPvhGnEBkuKJGXVxUGg-En4jbMjRV-ijhWTJ4jZDzhLpHnT2FBF7H\\_lsgZ2FhkOcXA3yXA](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953412001808?casa_token=qWKex-2pRI8AAAAA:TxkbPPvhGnEBkuKJGXVxUGg-En4jbMjRV-ijhWTJ4jZDzhLpHnT2FBF7H_lsgZ2FhkOcXA3yXA)
- Gan, P., Liu, F., Li, R., Wang, S. ET Luo, J. (2019). Chloroplasts—Beyond Energy Capture and Carbon Fixation: Tuning of Photosynthesis in Response to Chilling Stress. *International journal of molecular sciences*, 20(20), 5046. Repéré à <https://www.mdpi.com/1422-0067/20/20/5046>
- Gasser, M., Bolinder, O. M., Martel, S., Poulin, D., Beaudin, I., Michaud, A. R. et Drouin, A. (2010). *Impacts agroenvironnementaux associés à la culture et au prélèvement de biomasses végétales agricoles pour la production de bioproduits industriels* (Rapport final). Repéré à <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Publications/IRDAimpactBiomassefev2012.pdf>
- Gendron, C. (2014). Penser l'acceptabilité sociale: au-delà de l'intérêt, les valeurs. *Revue de communication sociale et publique*, (11), 117-129. Repéré à <https://journals.openedition.org/communiquer/584>
- Godbout, S., Palacios, J. H., Larouche, J. P., Brassard, P. et Pelletier, F. (2012). *Bilan énergétique, émissions gazeuses et particulaires de la combustion de la biomasse agricole à la ferme*. Repéré à [http://biopterre.jprouseau.com/wp-content/uploads/2016/10/godbout-et-al-2012\\_rapport\\_combustion\\_biomasse.pdf](http://biopterre.jprouseau.com/wp-content/uploads/2016/10/godbout-et-al-2012_rapport_combustion_biomasse.pdf)
- Goldemberg, J. (2000). World Energy Assessment: Energy and the challenge of sustainability. Repéré à <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20228512>
- Gordan, B. (2008). *Ecological Climatology: Concepts and Application* (2<sup>e</sup> éd.). Cambridge, Angleterre, Royaume-Uni : Cambridge, University, Press.
- Gouvernement du Canada. (2020a). *Initiative de foresterie autochtone*. Repéré à <https://www.rncan.gc.ca/science-donnees/financement-partenariats/occasions-de-financement/programmes-de-financement-du-sec/initiative-de-foresterie-autochtone/13126>
- Gouvernement du Canada. (2020b). *Projets financé par le programme Énergie propre pour les collectivités rurales et éloignées (ÉPCRE)*. Repéré à <https://www.rncan.gc.ca/changements-climatiques/lavenir-vert-du-canada/promouvoir-lenergie-propre-pour/projets-finance-par-le-programme-energie-propre-pour-les-collectivites-rurales-et-eloignees-epcre/22525>
- Grinde, A. R., Slesak, R. A., D'Amato, A. W. et Palik, B. P. (2020). Effects of tree retention and woody biomass removal on bird and small mammal communities. *Forest Ecology and Management*,

- 465, 118090. Repéré à  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112720303169?via%3Dihub>
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2006). *Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre*. Repéré à <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/french/index.html>
- Hammar, T., Stendahl, J., Sundberg, C., Holmström, H. et Hansson, P. A. (2019). Climate impact and energy efficiency of woody bioenergy systems from a landscape perspective. *Biomass and bioenergy*, 120, 189-199. Repéré à  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953418303222>
- Hannam, K. D., Fleming, R. L., Venier, L. et Hazlett, P. W. (2019). Can bioenergy ash applications emulate the effects of wildfire on upland forest soil chemical properties?. *Soil Science Society of America Journal*, 83, S201-S217. Repéré à <https://access-onlinelibrary-wiley-com.ezproxy.usherbrooke.ca/doi/pdfdirect/10.2136/sssaj2018.10.0380>
- Hannam, K. D., Venier, L., Allen, D., Deschamps, C., Hope, E., Jull, M.,...Hazlett, P. W. (2018). Wood ash as a soil amendment in Canadian forests: what are the barriers to utilization?. *Canadian Journal of Forest Research*, 48(4), 442-450. Repéré à  
<https://www.nrcresearchpress.com/doi/pdf/10.1139/cjfr-2017-0351>
- Hannam, K., Deschamps, C., Kwiaton, M., Venier, L. et Hazlett, P. W. (2016). *Regulations and guidelines for the use of wood ash as a soil amendment in Canadian forests*. Repéré à  
<http://oaresource.library.carleton.ca/wcl/2017/20170126/Fo123-2-17-2016-eng.pdf>
- Hannam, K., Deschamps, C., Kwiaton, M., Venier, L. et Hazlett, P. W. (2016). *Regulations and guidelines for the use of wood ash as a soil amendment in Canadian forests* (Rapport d'information). Repéré à <https://cfs.nrcan.gc.ca/entrepotpubl/pdfs/37782.pdf>
- Harmsen, P. F. H., Huijgen, W., Bermudez, L. et Bakker, R. (2010). *Literature review of physical and chemical pretreatment processes for lignocellulosic biomass* (Rapport de recherche et numéro: 1184) Repéré à <http://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/150289>
- Hébert, M. et Breton, B. (2009). Recyclage agricole des cendres de bois au Québec - État de la situation, impacts et bonnes pratiques agro-environnementales. *Agrosolutions*, 19, 18-33. Repéré à  
[https://www.agrireseau.net/agroenvironnement/documents/Recyclage\\_cendres.pdf](https://www.agrireseau.net/agroenvironnement/documents/Recyclage_cendres.pdf)
- Hmaied, M. (2019). *Étude de l'impact du conditionnement et du prétraitement de la biomasse forestière résiduelles sur les huiles essentielles* (Mémoire de maîtrise, Université du Québec en Abitibi Témiscamingue, Rouyn-Noranda, Québec, Canada). Repéré à  
<https://depositum.uqat.ca/id/eprint/860/>
- Holtmark, B. (2012). Harvesting in boreal forests and the biofuel carbon debt. *Climatic change*, 112(2), 415-428. Repéré à <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-011-0222-6>
- Homyack, J. A., Aardweg, Z., Gorman, T. A. et Chalcraft, D. R. (2013). Initial effects of woody biomass removal and intercropping of switchgrass (*Panicum virgatum*) on herpetofauna in eastern North Carolina. *Wildlife Society Bulletin*, 37(2), 327-335. Repéré à <https://wildlife-onlinelibrary-wiley-com.ezproxy.usherbrooke.ca/doi/pdfdirect/10.1002/wsb.248>
- Homyack, J. A., Lucia-Simmons, K. E., Miller, D. A. et Kalcounis-Rueppell, M. (2014). Rodent population and community responses to forest-based biofuel production. *The Journal of wildlife*

- management*, 78(8), 1425-1435. Repéré à <https://wildlife-onlinelibrary-wiley-com.ezproxy.usherbrooke.ca/doi/pdfdirect/10.1002/jwmng.786>
- Horn, S. et Hanula, J. L. (2008). Relationship of coarse woody debris to arthropod availability for red-cockaded woodpeckers and other bark-foraging birds on loblolly pine boles. *Journal of Entomological Science*, 43(2), 153-168. Repéré à <https://meridian.allenpress.com/jes/article-abstract/43/2/153/77152/Relationship-of-Coarse-Woody-Debris-to-Arthropod?redirectedFrom=fulltext>
- Hudiburg, T. W., Law, B. E., Wirth, C. et Luyssaert, S. (2011). Regional carbon dioxide implications of forest bioenergy production. *Nature Climate Change*, 1(8), 419-423. Repéré à <https://www.nature.com/articles/nclimate1264>
- Huntington, T. G. et Ryan, D. F. (1990). Whole-tree-harvesting effects on soil nitrogen and carbon. *Forest Ecology and Management*, 31(4), 193-204. Repéré à <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/abs/pii/037811279090067L>
- Huotari, N., Tillman-Sutela, E., Moilanen, M. et Laiho, R. (2015). Recycling of ash—For the good of the environment?. *Forest Ecology and Management*, 348, 226-240. Repéré à [https://www-sciencedirect-com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/pii/S0378112715001280?casa\\_token=Men\\_yOHOfXMAAAAA:tEM38QuXg6jg7M\\_XTn6eyVSaGGNcDamNnweFVw1m3363FKD3O6x\\_G\\_enmKTj0Fml-LRR\\_beS6dJm](https://www-sciencedirect-com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/pii/S0378112715001280?casa_token=Men_yOHOfXMAAAAA:tEM38QuXg6jg7M_XTn6eyVSaGGNcDamNnweFVw1m3363FKD3O6x_G_enmKTj0Fml-LRR_beS6dJm)
- Hydro-Québec. (2014). *L'énergie de la biomasse*. Repéré à <https://www.hydroquebec.com/data/developpement-durable/pdf/fiche-biomasse.pdf>
- Hydro-Québec. (2019). *Portrait des ressources énergétiques d'Hydro-Québec*. Repéré à <http://www.hydroquebec.com/data/achats-electricite-quebec/pdf/portrait-ressources-energetiques.pdf>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013). *Climate change 2013: The physical science basis*. Repéré à [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5\\_all\\_final.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Repéré à [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc\\_wg3\\_ar5\\_full.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_full.pdf)
- International Energy Agency (IEA). (2017). *Response to Chatham House report "Woody Biomass for Power and Heat: Impacts on the Global Climate"*. Repéré à [https://gallery.mailchimp.com/f902b070150dd13840a31e93e/files/d0ce8967-0aba-44e8-9bb5-5dabec3c45ea/Chatham\\_House\\_response\\_supporting\\_doc.pdf](https://gallery.mailchimp.com/f902b070150dd13840a31e93e/files/d0ce8967-0aba-44e8-9bb5-5dabec3c45ea/Chatham_House_response_supporting_doc.pdf)
- Inukshuk Synergie. (s. d.). *Des solutions énergétiques renouvelables*. Repéré à <http://inukshuksynergie.com/#a-propos>
- Jacobson, M. et Ciolkosz, D. (2013). *Wood-Based Energy in the Northern Forests*. Repéré à <https://link-springer-com.ezproxy.usherbrooke.ca/book/10.1007%2F978-1-4614-9478-2>
- Jia-bing, W., De-xin, G., Shi-jie, H., Mi, Z. et Chang-Jie, J. (2005). Ecological functions of coarse woody debris in forest ecosystem. *Journal of Forestry Research*, 16(3), 247-252. Repéré à <https://link-springer-com.ezproxy.usherbrooke.ca/content/pdf/10.1007/BF02856826.pdf>

- Johnson, D. W. et Curtis, P. S. (2001). Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis. *Forest ecology and management*, 140(2-3), 227-238. Repéré à [https://www-sciencedirect-com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/pii/S0378112700002826?casa\\_token=zbrpnwT8UJ4AAAAA:tokVa5EtpPrlyn27OOwsvK6\\_ASjCN9CzirJnDSGLpeEfQ8aVrlmGiwXn1CLXiGwbyfYg5YKYQ](https://www-sciencedirect-com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/pii/S0378112700002826?casa_token=zbrpnwT8UJ4AAAAA:tokVa5EtpPrlyn27OOwsvK6_ASjCN9CzirJnDSGLpeEfQ8aVrlmGiwXn1CLXiGwbyfYg5YKYQ)
- Johnson, E. (2009). Goodbye to carbon neutral: Getting biomass footprints right. *Environmental impact assessment review*, 29(3), 165-168. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0195925508001637>
- Klein, D., Wolf, C., Schulz, C. et Weber-Blaschke, G. (2015). 20 years of life cycle assessment (LCA) in the forestry sector: state of the art and a methodical proposal for the LCA of forest production. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(4), 556-575. Repéré à <https://link-springer-com.ezproxy.usherbrooke.ca/content/pdf/10.1007/s11367-015-0847-1.pdf>
- Kpogbemabou, D. (2011). Procédé de fabrication de biocarburants à partir de biomasse lignocellulosique biologiquement déstructurée (Thèse de doctorat, Université de Poitiers, Poitiers, France). Repéré à <http://nuxeo.edel.univ-poitiers.fr/nuxeo/site/esupversions/7fd615c5-8c38-410c-b7cc-cb5b1011ea0a>
- La Commission mondiale des Nations unies pour l'environnement et le développement durable. (2014). Notre avenir à tous (5<sup>e</sup> édition). Montréal, Québec, Canada : Éditions LAMBD A.
- Lachance, M. (2015). Une filière d'intérêt pour un Québec vert. *Vecteur Environnement*, 48(1), 30-32. Repéré à <https://search.proquest.com/docview/1646982663?pq-origsite=gscholar>
- Laganière, J., Paré, D., Thiffault, E. et Bernier, P. Y. (2017). Range and uncertainties in estimating delays in greenhouse gas mitigation potential of forest bioenergy sourced from Canadian forests. *Global Change Biology Bioenergy*, 9(2), 358-369. Repéré à <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcbb.12327>
- Laigle, I. (2018). *Évaluation intégrée des impacts des prélèvements de biomasse forestière sur la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes*. (Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada). Repéré à [https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/12252/Laigle\\_Idaline\\_PhD\\_2018.pdf?sequence=18&isAllowed=y](https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/12252/Laigle_Idaline_PhD_2018.pdf?sequence=18&isAllowed=y)
- Lamers, F., Cremers, M., Matschegg, D., Schmidl, C., Hannam, K., Hazlett, P.,...Davidsson, K. (2018). *Options for increased use of ash from biomass combustion and co-firing*. Repéré à <https://cfs.nrcan.gc.ca/entrepotpubl/pdfs/39461.pdf>
- Lamers, P. et Junginger, M. (2013). The 'debt' is in the detail: A synthesis of recent temporal forest carbon analyses on woody biomass for energy. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 7(4), 373-385. Repéré à <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/bbb.1407>
- Land, Y., Perreault, G. et Dion, C. (2015). *Conservation des chicots et des arbres sénescents pour la faune : Les chicots, plus de vie qu'il n'y paraît*. Repéré à <https://quebecoiseaux.org/index.php/fr/publications/autres/file/65-les-chicots-plus-de-vie-qu-il-n-y-parait?start=20>
- Laurent, A. B. (2014). Analyse de cycle de vie comparative entre l'utilisation de la biomasse forestière à des fins énergétiques avec les autres sources énergétiques utilisées préalablement au CSSS

- d'Amqui. Repéré à [https://www.researchgate.net/publication/305681054\\_Analyse\\_de\\_cycle\\_de\\_vie\\_comparative\\_entre\\_l'utilisation\\_de\\_la\\_biomasse\\_forestiere\\_a\\_des\\_fins\\_energetiques\\_avec\\_les\\_autres\\_sourc\\_es\\_energetiques\\_utilisee\\_prealablement\\_au\\_CSSS\\_s'Amqui\\_Vallee\\_de\\_la\\_Matap](https://www.researchgate.net/publication/305681054_Analyse_de_cycle_de_vie_comparative_entre_l'utilisation_de_la_biomasse_forestiere_a_des_fins_energetiques_avec_les_autres_sourc_es_energetiques_utilisee_prealablement_au_CSSS_s'Amqui_Vallee_de_la_Matap)
- Le Roux, E. (2015). *Amélioration des propriétés des huiles pyrolytiques: Par hydrotraitement de la biomasse* (Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Québec, Canada). Repéré à <https://corpus.ulaval.ca/jspui/bitstream/20.500.11794/25780/1/31386.pdf>
- Léveillé, J-T. (2019, 24 décembre). Crise du propane : la demande pour la biomasse bondit. *La Presse*. Repéré à <https://www.lapresse.ca/actualites/2019-12-24/crise-du-propane-la-demande-pour-la-biomasse-bondit>
- Limousy, L., Jeguirim, M., Dutournié, P., Kraiem, N., Lajili, M. et Said, R. (2013). Gaseous products and particulate matter emissions of biomass residential boiler fired with spent coffee grounds pellets. *Fuel*, 107, 323-329. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236112008162>
- Liu, W., Yu, Z., Xie, X., Von Gadow, K., et Peng, C. (2018). A critical analysis of the carbon neutrality assumption in life cycle assessment of forest bioenergy systems. *Environmental Reviews*, 26(1), 93-101. Repéré à <https://www.nrcresearchpress.com/doi/full/10.1139/er-2017-0060#.XoOY3ohKhPY>
- Lohr, S. M., Gauthreaux, S. A. et Kilgo, J. C. (2002). Importance of coarse woody debris to avian communities in loblolly pine forests. *Conservation Biology*, 16(3), 767-777. Repéré à <https://conbio.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1046/j.1523-1739.2002.01019.x>
- Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier*, L.R.Q., c.A-18.1
- Loi sur l'assainissement de l'atmosphère*, L.R.Q., c.r. 4.1
- Loi sur la qualité de l'environnement*, L.R.Q., c.Q-2
- Loi sur le développement durable*, L.R.Q., c.D-8.1.1
- Lunnan, A., Vilkriste, L., Wilhelmsen, G., Mizaraite, D., Asikainen, A. et Röser, D. (2008). Policy and economic aspects of forest energy utilisation. Repéré à [https://link-springer-com.ezproxy.usherbrooke.ca/chapter/10.1007/978-1-4020-5054-1\\_8](https://link-springer-com.ezproxy.usherbrooke.ca/chapter/10.1007/978-1-4020-5054-1_8)
- Majeau, J. A., Hébert, M. et Desforges, J. (2013). Les cendres de poêles à bois. *Vecteur environnement*, 46(3), 43-49. Repéré à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/matieres/articles/cendre-poele-bois-201305.pdf>
- Manaham, S. (2009). *Fundamentals of environmental chemistry* (3<sup>e</sup> éd.). Boca raton, Floride, États-unis : Taylor & Francis Group.
- Mansuy, N., Barrette, J., Laganière, J., Mabée, W., Paré, D., Gautam, S., Thiffault, E. et Ghafghazi, S. (2018). Salvage harvesting for bioenergy in Canada: From sustainable and integrated supply chain to climate change mitigation. *Energy and Environment*, 7(5), 1-14. Repéré à <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/wene.298>
- Mansuy, N., Paré, D., Thiffault, E., Bernier, P. Y., Cyr, G., Manka, F.,...Guindon, L. (2017). Estimating the spatial distribution and locating hotspots of forest biomass from harvest residues and fire-

- damaged stands in Canada's managed forests. *Biomass and Bioenergy*, 97, 90-99. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953416303877>
- Mattson, K. G. et Swank, W. T. (1989). Soil and detrital carbon dynamics following forest cutting in the Southern Appalachians. *Biology and Fertility of Soils*, 7(3), 247-253. Repéré à <https://link-springer-com.ezproxy.usherbrooke.ca/article/10.1007/BF00709656>
- Mayer, M., Prescott, C. E., Abaker, W. E., Augusto, L., Cécillon, L., Ferreira, G. W.,...Laganière, J. (2020). Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis. *Forest Ecology and Management*, 466, 118127. Repéré à <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/pii/S0378112720300268>
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Bioresource technology*, 83(1), 47-54. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852401001195>
- Mharssi, M. (2019). *Valorisation des copeaux de bois pour la production des granules énergétiques* (Thèse de doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, Québec, Canada). Repéré à <https://depositum.uqat.ca/id/eprint/849/>
- Michel, J. P. et Robert, L. E. (2008). *Des résidus forestiers pour les biocarburants, un choix judicieux?* Repéré à <https://www.gaiapresse.ca/2008/11/des-residus-forestiers-pour-les-biocarburants-un-choix-judicieux/>
- Mika, A. M. et Keeton, W. S. (2015). Net carbon fluxes at stand and landscape scales from wood bioenergy harvests in the US Northeast. *Global Change Biology Bioenergy*, 7(3), 438-454. Repéré à <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcbb.12143>
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN). (2016). *Politique énergétique 2030 : l'énergie des québécois*. Repéré à <https://mern.gouv.qc.ca/energie/politique-energetique/>
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN). (2018). *Plan directeur en transition, innovation et efficacité énergétiques du Québec 2018 - 2023*. Repéré à <https://mern.gouv.qc.ca/energie/politique-energetique/>
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN). (2018). Impact combiné des précipitations acides et du prélèvement de biomasse forestière sur le maintien à long terme de la fertilité des sols : évaluation et cartographie des charges critiques. Repéré à <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Ouimet-Rock/Rap-hors-serie-Impact.pdf>
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). (2019). *Guide de quantification des émissions de gaz à effet de serre*. Repéré à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/guide-quantification/guide-quantification-ges.pdf>
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). (s. d.). *Le chauffage au bois*. Repéré à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/air/chauf-bois/>
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). (2006). *Profil des produits forestiers – Première transformation : Biomasse forestière résiduelle – Inventaire des méthodes et équipements de récupération ainsi que des systèmes de combustion les plus courants*. Repéré à <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/entreprises/biomasse-forestiere.pdf>



- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). (2009). *Plan d'action : vers la valorisation de la biomasse forestière*. Repéré à <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/entreprises/plan-action-biomasse.pdf>
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). (2011). *Profil des produits forestiers – Technologies de bioénergies à base de biomasse forestière*. Repéré à [http://agroenergie.ca/pdf/Applications\\_commerciales/Technologies\\_bioenergies.pdf](http://agroenergie.ca/pdf/Applications_commerciales/Technologies_bioenergies.pdf)
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). (2013) *Le nouveau régime forestier : biomasse forestière*. Repéré à <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/comprendre/fiche-biomasse.pdf>
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). (2016). *L'éclaircie précommerciale systématique de peuplements résineux*. Repéré à <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/entreprises/fiches/eclaircie-precommerciale-systematique-peuplements.pdf>
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). (2017a) *Le nouveau régime forestier : garantie d'approvisionnement*. Repéré à <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/comprendre/fiche-garantie.pdf>
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). (2017b). *Ressources et industrie forestière du Québec : portrait statistique*. Repéré à <https://mffp.gouv.qc.ca/les-forets/connaissances/statistiques-forestieres/editions-anterieures/>
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). (2018). *Ressources et industrie forestière du Québec : portrait statistique*. Repéré à <https://mffp.gouv.qc.ca/les-forets/connaissances/statistiques-forestieres/>
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). (2019a). *Compilation des données issues des registres forestiers 2018*. Repéré à <https://mffp.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/registres-forestiers.pdf>
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). (2019b). *Aires infestées par la tordeuse des bourgeons de l'épinette au Québec en 2019*. Repéré à [https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/fimaq/insectes/tordeuse/TBE\\_2019\\_P.pdf](https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/fimaq/insectes/tordeuse/TBE_2019_P.pdf)
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). (s. d.a). *Aménagement durable des forêts*. Repéré à <https://mffp.gouv.qc.ca/les-forets/amenagement-durable-forets/>
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). (s. d.b). *Permis de récolte aux fins d'approvisionner une usine de la transformation de bois (PRAU)*. Repéré à <https://mffp.gouv.qc.ca/les-forets/amenagement-durable-forets/les-droits-consentis/prau/>
- Mitchell, S. R., Harmon, M. E. et O'Connell, K. E. (2012). Carbon debt and carbon sequestration parity in forest bioenergy production. *Global Change Biology Bioenergy*, 4(6), 818-827. Repéré à <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1757-1707.2012.01173.x>
- Molles, M., Cahill, J. et Lauren, A. (2017). *Ecology: concepts and applications* (4<sup>e</sup> éd.). Whitby, Ontario, Canada : McGraw-Hill Ryerson.
- Mooney, C. et Grandoni, D. (2018, 23 avril). Scott Pruitt wades into a fraught science debate, declaring biomass burning 'carbon neutral'. *The Washington Post*. Repéré à

- <https://www.washingtonpost.com/news/energy-environment/wp/2018/04/23/scott-pruitt-wades-into-a-fraught-science-debate-declaring-biomass-burning-carbon-neutral/>
- Morency, P.-O. (2011). *Le potentiel de valorisation de la biomasse forestière à des fins énergétiques au Québec : état de la situation* (Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Québec, Canada). Repéré à <https://corpus.ulaval.ca/jspui/handle/20.500.11794/22742>
- Morris, D. M., Hazlett, P. W., Fleming, R. L., Kwiaton, M. M., Hawdon, L. A., Leblanc, J. D. et Weldon, T. P. (2019). Effects of biomass removal levels on soil carbon and nutrient reserves in conifer-dominated, coarse-textured sites in Northern Ontario: 20-Year results. *Soil Science Society of America Journal*, 83, S116-S132. Repéré à <https://acsess-onlinelibrary-wiley-com.ezproxy.usherbrooke.ca/doi/pdfdirect/10.2136/sssaj2018.08.0306>
- Morris, L. A. ET Miller, R. E. (1994). *Evidence for long-term productivity change as provided by field trials. In Impacts of forest harvesting on long-term site productivity*. Repéré à [https://link-springer-com.ezproxy.usherbrooke.ca/chapter/10.1007/978-94-011-1270-3\\_3](https://link-springer-com.ezproxy.usherbrooke.ca/chapter/10.1007/978-94-011-1270-3_3)
- Mvolo, C. S. (2010). *Valorisation thermochimique et biochimique de la biomasse ligneuse forestière au Québec : possibles implications pour l'aménagement forestier et les industries traditionnelles de la fibre* (Rapport de synthèse environnementale). Repéré à [https://www.researchgate.net/publication/281110602\\_Vvalorisation\\_thermochimique\\_et\\_biochimique\\_de\\_la\\_biomasse\\_ligneuse\\_forestiere\\_au\\_Quebec\\_possibles\\_implications\\_pour\\_l'amenagement\\_forestier\\_et\\_les\\_industries\\_traditionnelles\\_de\\_la\\_fibre](https://www.researchgate.net/publication/281110602_Vvalorisation_thermochimique_et_biochimique_de_la_biomasse_ligneuse_forestiere_au_Quebec_possibles_implications_pour_l'amenagement_forestier_et_les_industries_traditionnelles_de_la_fibre)
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2020a). *Global Annual Temperature Rankings Outlook*. Repéré à <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/202003/supplemental/page-2>
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2020b). *Climate Change: Global Temperature*. Repéré à <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature>
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2020c). *Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide*. Repéré à <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>
- Nature Québec. (2014a). *Biomasse forestière : document de synthèse*. Repéré à [https://visionbiomassequebec.org/?page\\_id=16](https://visionbiomassequebec.org/?page_id=16)
- Nature Québec. (2014b). *Biomasse forestière : santé des communautés*. Repéré à [https://visionbiomassequebec.org/wp-content/uploads/2019/07/FI14-07\\_BioFor\\_2\\_Sante\\_web.pdf](https://visionbiomassequebec.org/wp-content/uploads/2019/07/FI14-07_BioFor_2_Sante_web.pdf)
- Nature Québec. (s. d.). *Biomasse forestière*. Repéré à <https://naturequebec.org/projets/biomasse/#1545252743221-712f739a-4f55c530-1416>
- Nunes, L. J. R., Causer, T. P. et Ciolkosz, D. (2020). Biomass for energy: A review on supply chain management models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 1-8. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119308640>
- O'donohue, M. J. (2008). La production de carburants à partir de biomasse lignocellulosique par voie biologique: état de l'art et perspectives. *Oléagineux, Corps gras, Lipides*, 15(3), 172-177. Repéré à <https://www.ocl-journal.org/articles/ocl/abs/2008/03/ocl2008153p172/ocl2008153p172.html>

- Office québécois de la langue française (OQLF). (2016). Fiche terminologique “Biomasse”. Repéré à [http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id\\_Fiche=8395619](http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8395619)
- Olsson, B. A., Bengtsson, J. et Lundkvist, H. (1996). Effects of different forest harvest intensities on the pools of exchangeable cations in coniferous forest soils. *Forest Ecology and Management*, 84(1-3), 135-147. Repéré à <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/pii/0378112796037309>
- Olsson, B. A., Staaf, H., Lundkvist, H., Bengtsson, J. et Kaj, R. (1996). Carbon and nitrogen in coniferous forest soils after clear-felling and harvests of different intensity. *Forest ecology and management*, 82(1-3), 19-32. Repéré à <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/pii/0378112795036970>
- Opérations forestières et de scierie. (2017). *Innover avec la biomasse forestière*. Repéré à <https://www.operationsforestieres.ca/innover-avec-la-biomasse-forestiere-2594/>
- Ordre des ingénieurs forestiers du Québec (OIFQ). (2009) *Manuel de foresterie* (2<sup>e</sup> éd.). Repéré à <https://www.oifq.com/centre-de-documentation/manuel-de-foresterie>
- Osman, K. T. (2013). *Soils: Principles, Properties and Management*. Repéré à [https://link-springer-com.ezproxy.usherbrooke.ca/chapter/10.1007/978-94-007-5663-2\\_14](https://link-springer-com.ezproxy.usherbrooke.ca/chapter/10.1007/978-94-007-5663-2_14)
- Ouimet et Duchesne. (2009). *Évaluation des types écologiques forestiers sensibles à l'appauvrissement des sols en minéraux par la récolte de biomasse*. Repéré à <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Ouimet-Rock/Rap-hors-serie-evaluation.pdf>
- Oumouhou, M. (2012). *Impacts de l'extraction de biomasse forestière sur le sol et la productivité des stations forestières* (Mémoire de maîtrise, Université du Québec en Abitibi Témiscamingue, Rouyn-Noranda, Québec, Canada). Repéré à <https://depositum.uqat.ca/id/eprint/599/>
- Paletto, A., Bernardi, S., Pieratti, E., Teston, F. et Romagnoli, M. (2019). Assessment of environmental impact of biomass power plants to increase the social acceptance of renewable energy technologies. *Heliyon*, 5(7). Repéré à <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/pii/S2405844019357305>
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A.,...Ciais, P. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988-993. Repéré à [https://science.sciencemag.org/content/333/6045/988.abstract?casa\\_token=C2iFOnUhvgQAAA:AA:hUoUt0-SYO7ogHBGFyVikMw\\_s\\_miqZmLS86YNb1wAh\\_drHfVo0DaBNbzTCFIW1rCCXLT2ggk7bDbg](https://science.sciencemag.org/content/333/6045/988.abstract?casa_token=C2iFOnUhvgQAAA:AA:hUoUt0-SYO7ogHBGFyVikMw_s_miqZmLS86YNb1wAh_drHfVo0DaBNbzTCFIW1rCCXLT2ggk7bDbg)
- Paré, D., Bernier, P., Thiffault, E. et Titus, B. (2011). Le potentiel de la biomasse forestière comme source d'énergie pour le Canada. *The Forestry Chronicle*, 87(3), 345-350. Repéré à <https://pubs.cif-ifc.org/doi/abs/10.5558/tfc2011-024>
- Paré, D., Rochon, P. et Brais, S. (2002). Assessing the geochemical balance of managed boreal forests. *Ecological Indicators*, 1(4), 293-311. Repéré à [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X02000262?casa\\_token=XenN\\_BkOCxIAAAAA:13WyduJ4pUbZuvaM79cyVxff02DqQLP3RLjAbM7qXZwpnOYvHG\\_x00rVavnQH7JrD2w1e9BZKQ](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X02000262?casa_token=XenN_BkOCxIAAAAA:13WyduJ4pUbZuvaM79cyVxff02DqQLP3RLjAbM7qXZwpnOYvHG_x00rVavnQH7JrD2w1e9BZKQ)

- Penttilä, R., Siitonen, J. et Kuusinen, M. (2004). Polypore diversity in managed and old-growth boreal *Picea abies* forests in southern Finland. *Biological conservation*, 117(3), 271-283. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0006320703004889?via%3Dihub>
- Perschel, B., Evans, A. et DeBonis, M. (2012). *Forest biomass retention and harvesting guidelines for the Southeast*. Repéré à [https://www.researchgate.net/publication/323811630\\_Forest\\_biomass\\_retention\\_and\\_harvesting\\_guidelines\\_for\\_the\\_Southeast](https://www.researchgate.net/publication/323811630_Forest_biomass_retention_and_harvesting_guidelines_for_the_Southeast)
- Petrov, O. (2012). *La transformation des résidus forestiers en énergie favorise-t-elle la santé des collectivités?*. Repéré à [https://ccnse.ca/sites/default/files/Transformation\\_residus\\_forestiers\\_en\\_energie\\_mar\\_2012.pdf](https://ccnse.ca/sites/default/files/Transformation_residus_forestiers_en_energie_mar_2012.pdf)
- Poulsen, T. G. et Adelard, L. (2016). Improving biogas quality and methane yield via co-digestion of agricultural and urban biomass wastes. *Waste management*, 54, 118-125. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X16302525>
- Proe, M. F. et Dutch, J. (1994). Impact of whole-tree harvesting on second-rotation growth of Sitka spruce: the first 10 years. *Forest Ecology and Management*, 66(1-3), 39-54. Repéré à <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/abs/pii/0378112794901473>
- Ravelic, P., Ryans, M. et Cormier, D. (2010). Assessing forest biomass for bioenergy: Operational challenges and cost considerations. *The Forestry Chronicle*, 86(1), 43-50. Repéré à <https://pubs.cif-ifc.org/doi/abs/10.5558/tfc86043-1>
- Raymer, A. K. P. (2006). A comparison of avoided greenhouse gas emissions when using different kinds of wood energy. *Biomass and Bioenergy*, 30(7), 605-617. Repéré à [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953406000389?casa\\_token=kHXZjSyPuT8AAAAA:3sLTmjxcPH-qwpYtIbNGrbS0bQZAvJfetf35wIYvZe2GJzLkpH2B0m2rlk0JCcSX2GsVkq0RJQ](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953406000389?casa_token=kHXZjSyPuT8AAAAA:3sLTmjxcPH-qwpYtIbNGrbS0bQZAvJfetf35wIYvZe2GJzLkpH2B0m2rlk0JCcSX2GsVkq0RJQ)
- RECYC-QUÉBEC. (2017). *Bilan 2015 de la gestion des matières résiduelles au Québec*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/bilan-gmr-2015.pdf>
- RECYC-QUÉBEC. (2018). *Matière organique : fiche informative*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/Fiche-info-matieres-organiques.pdf>
- Régie de l'énergie du Canada. (2020). *Profils énergétiques des provinces et territoires – Québec*. Repéré à <https://www.cer-rec.gc.ca/nrg/ntgrtd/mrkt/nrgsstmprfls/qc-fra.html?&wbdisable=true>
- Regroupement national des conseils régionaux de l'environnement (RNCREQ). (2013). *Plate-forme énergie : Filière de la biomasse forestière*. Repéré à [http://www.rncreq.org/images/UserFiles/files/Plateforme\\_Biomasse\\_foresti%C3%A8re\\_RNCREQ\(1\).pdf](http://www.rncreq.org/images/UserFiles/files/Plateforme_Biomasse_foresti%C3%A8re_RNCREQ(1).pdf)
- Réseau d'expertise et de valorisation en biomasse forestière. (2013). *Mémoire présenté par le Réseau d'expertise et de valorisation en biomasse forestière à la Commission sur les enjeux énergétiques du Québec*. Repéré à

- [https://mern.gouv.qc.ca/energie/politique/memoires/20131011\\_364\\_Reseau\\_biomasse\\_forestiere\\_M.pdf](https://mern.gouv.qc.ca/energie/politique/memoires/20131011_364_Reseau_biomasse_forestiere_M.pdf)
- Richardson, J., Björheden, R., Hakkila, P., Lowe, A. T. et Smith, C. T. (2006). *Bioenergy from sustainable forestry: guiding principles and practice*. Repéré à <https://ebookcentral.proquest.com/lib/usherbrookemgh-ebooks/detail.action?docID=3035655>
- Riffell, S. K., Verschuyl, J. P., Miller, D. A. et Wigley, T. B. (2011). *Relationships between intensive biomass production and biodiversity in North American forests—a literature review*. Technical bulletin no, 992. Repéré à [https://www.dnr.wa.gov/Publications/em\\_fp\\_biomass\\_relationships\\_between\\_intensive\\_biomass\\_production\\_and\\_biodiversity.pdf](https://www.dnr.wa.gov/Publications/em_fp_biomass_relationships_between_intensive_biomass_production_and_biodiversity.pdf)
- Roberts, S. D., Harrington, C. A. et Terry, T. A. (2005). Harvest residue and competing vegetation affect soil moisture, soil temperature, N availability, and Douglas-fir seedling growth. *Forest Ecology and Management*, 205(1-3), 333-350. Repéré à [https://www.sciencedirect.com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/pii/S0378112704007686?casa\\_token=AdLtJ6ma2CoAAAAA:5HL5RkZHCkDYmoW4nBbPCbPEH\\_jPge7KNL3CMhYjh2AiGo-Kdp25uN285-wEX3mlLeuJjeo91g](https://www.sciencedirect.com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/pii/S0378112704007686?casa_token=AdLtJ6ma2CoAAAAA:5HL5RkZHCkDYmoW4nBbPCbPEH_jPge7KNL3CMhYjh2AiGo-Kdp25uN285-wEX3mlLeuJjeo91g)
- Rompré, G., Boucher, Y., Bélanger, L., Côté, S. et Robinson, W. D. (2010). *Conservation de la biodiversité dans les paysages forestiers aménagés: utilisation des seuils critiques d'habitat*. The Forestry Chronicle, 86(5), 572-579. Repéré à <https://pubs.cif-ifc.org/doi/pdf/10.5558/tfc86572-5>
- Röser, D., Asikainen, A., Raulund-Rasmussen, K. et Stupak, I. (2008). *Sustainable use of forest biomass for energy: a synthesis with focus on the Baltic and Nordic region*. Repéré à <https://ebookcentral.proquest.com/lib/usherbrookemgh-ebooks/detail.action?docID=3062887>
- Roy, M. È., Nolet, P. et Ltée, S. C. (2013). *Suivi de dispositif de récolte de la biomasse forestière sur la biodiversité animale et végétale*. Institut des sciences de la forêt tempérée-Université du Québec en Outaouais. Repéré à [https://isfort.uqo.ca/wp-content/uploads/2019/01/Roy\\_Nolet\\_2013\\_Suivi-de-dispositif-de-r%C3%A9colte-de-la-biomasse-foresti%C3%A8re-sur-la-biodiversit%C3%A9-animale-et-v%C3%A9g%C3%A9tale.pdf](https://isfort.uqo.ca/wp-content/uploads/2019/01/Roy_Nolet_2013_Suivi-de-dispositif-de-r%C3%A9colte-de-la-biomasse-foresti%C3%A8re-sur-la-biodiversit%C3%A9-animale-et-v%C3%A9g%C3%A9tale.pdf)
- Saulnier, P-A. (2019, 3 décembre). Pour certains agriculteurs, le manque de propane est loin d'être anodin. *Radio-Canada*. Repéré à <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1403672/agriculture-mais-carburant-sechage-grain-gaz-propane-incontournable>
- Schlamadinger, B., Spitzer, J., Kohlmaier, G. H. et Lüdeke, M. (1995). *Carbon balance of bioenergy from logging residues*. Biomass and bioenergy, 8(4), 221-234. Repéré à <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/pii/0961953495000208>
- Schulze, E. D., Körner, C., Law, B. E., Haberl, H. ET Luyssaert, S. (2012). Large-scale bioenergy from additional harvest of forest biomass is neither sustainable nor greenhouse gas neutral. *Global Change Biology Bioenergy*, 4(6), 611-616. Repéré à <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1757-1707.2012.01169.x>
- Science News Staff. (2018). U.S. EPA says it will define wood as a 'carbon-neutral' fuel, reigniting debate, *Science*. Repéré à <https://www.sciencemag.org/news/2018/04/us-epa-says-it-will-define-wood-carbon-neutral-fuel-reigniting-debate>

- Sedjo, R. A. (1989). Forests: a tool to moderate global warming?. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 31(1), 14-20. Repéré à <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00139157.1989.9929929?journalCode=venv20>
- Sedjo, R. et Sohngen, B. (2012). Carbon sequestration in forests and soils. *Annual Review of Resource Economincs*, 4(1), 127-144. Repéré à <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-resource-083110-115941>
- Serra, R., Niknia, I., Paré, D., Titus, B., Gagnon, B. et Laganière, J. (2019). From conventional to renewable natural gas: can we expect GHG savings in the near term? *Biomass and Bioenergy*, 131, 1-11. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953419303459>
- Service Forêt-Énergie. (2018). *Chauffage à la biomasse forestière*. Repéré à [https://www.cooperativehabitation.coop/wp-content/uploads/2018/11/Rapport-int%C3%A9gration\\_biomasse-foresti%C3%A8re\\_CQCH\\_vf\\_mars-2018.pdf](https://www.cooperativehabitation.coop/wp-content/uploads/2018/11/Rapport-int%C3%A9gration_biomasse-foresti%C3%A8re_CQCH_vf_mars-2018.pdf)
- Sjølie, H. K., Trømborg, E., Solberg, B. et Bolkesjø, T. F. (2010). Effects and costs of policies to increase bioenergy use and reduce GHG emissions from heating in Norway. *Forest Policy and Economics*, 12(1), 57-66. Repéré à [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389934109000975?casa\\_token=STW60tldpwQAAAAA:BUjgaEUHVtbdRK1bwZtGquwf-3yCZA2bJTL9zYgvs7bFqkRk0QvUHMB-J8JecsTq3dfpxcMlg](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389934109000975?casa_token=STW60tldpwQAAAAA:BUjgaEUHVtbdRK1bwZtGquwf-3yCZA2bJTL9zYgvs7bFqkRk0QvUHMB-J8JecsTq3dfpxcMlg)
- Société d'aide au développement des collectivités (SADC). (s. d.). *C'est quoi le développement durable (DD)?*. Repéré à <http://sadcvc.ca/developpement-durable/cest-quoi-le-developpement-durable/>
- Strauss, W. (2011). How Manomet got it Backwards: Challenging the "debt-then-dividend" axiom. *Renewable Energy World North America Magazine*, 3(4), 40-42. Repéré à <https://futuremetrics.info/wp-content/uploads/2013/07/Manomet-Got-it-Backwards.pdf>
- Thiffault, E., Hannam, K. D., Paré, D., Titus, B. D., Hazlett, P. W., Maynard, D. G. et Brais, S. (2011). Effects of forest biomass harvesting on soil productivity in boreal and temperate forests—A review. *Environmental Reviews*, 19(NA), 278-309. Repéré à <https://www.nrcresearchpress.com/doi/pdf/10.1139/a11-009>
- Thiffault, E., Paré, D., Bélanger, N., Munson, A. et Marquis, F. (2006). Harvesting intensity at clear-felling in the boreal forest. *Soil Science Society of America Journal*, 70(2), 691-701.
- Thiffault, E., Samuel, A. S.-L. et Serra, R. (2015). La récolte de biomasse forestière : saines pratiques et enjeux écologiques dans la forêt boréale canadienne. Repéré à [https://www.researchgate.net/profile/Rut\\_Serra/publication/316553791\\_Forest\\_Biomass\\_Harvesting\\_Recommended\\_Practices\\_and\\_Ecological\\_Issues\\_in\\_the\\_Canadian\\_Boreal\\_Forest/links/590388bda6fdccd580d0012d/Forest-Biomass-Harvesting-Recommended-Practices-and-Ecological-Issues-in-the-Canadian-Boreal-Forest.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Rut_Serra/publication/316553791_Forest_Biomass_Harvesting_Recommended_Practices_and_Ecological_Issues_in_the_Canadian_Boreal_Forest/links/590388bda6fdccd580d0012d/Forest-Biomass-Harvesting-Recommended-Practices-and-Ecological-Issues-in-the-Canadian-Boreal-Forest.pdf)
- Thorn, S., Bässler, C., Bernhardt-Römermann, M., Cadotte, M., Heibl, C., Schäfer, H. et Müller, J. (2016). Changes in the dominant assembly mechanism drive species loss caused by declining resources. *Ecology Letters*, 19(2), 163-170. Repéré à [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ele.12548?casa\\_token=Iz4JEGm8raIAAAAA%3A8-jQBnK3TqEDSvUtbAZYminP95m8zB81HTTbRyNHxS4\\_Egus7voXlsvT7TAZ\\_-tFifVrBOn48hcyxQA](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ele.12548?casa_token=Iz4JEGm8raIAAAAA%3A8-jQBnK3TqEDSvUtbAZYminP95m8zB81HTTbRyNHxS4_Egus7voXlsvT7TAZ_-tFifVrBOn48hcyxQA)

- Timmons, D. S., Buchholz, T. et Veeneman, C. H. (2016). Forest biomass energy: Assessing atmospheric carbon impacts by discounting future carbon flows. *Global Change Biology Bioenergy*, 8(3), 631-643. Repéré à <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcbb.12276>
- Torlaschi, E. (2010). *Phénomènes radiatifs dans l'atmosphère terrestre*. Repéré à <http://people.sca.uqam.ca/~enrico/sca5002/NotesDeCours/3-Radiation.pdf>
- Transition énergétique Québec (TEQ). (2019). *Facteurs d'émission et de conversion*. Repéré à <https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/fileadmin/medias/pdf/FacteursEmission.pdf>
- Transition énergétique Québec (TEQ). (s. d.). *Biomasse forestière résiduelle*. Repéré à <https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/affaires/programmes/biomasse-forestiere-residuelle>
- Van Loo, S. et Koppejan, J. (2008). *The handbook of biomass combustion and co-firing*. Sterling, Virginie, États-Unis : Earthscan.
- Vanguelova, E., Pitman, R., Luiro, J. et Helmisaari, H. S. (2010). Long term effects of whole tree harvesting on soil carbon and nutrient sustainability in the UK. *Biogeochemistry*, 101(1-3), 43-59. Repéré à <https://link-springer-com.ezproxy.usherbrooke.ca/content/pdf/10.1007/s10533-010-9511-9.pdf>
- VanLoon, G. W. et Duffy, S. J. (2017). *Environmental chemistry: a global perspective* (3<sup>e</sup> éd.). New York, New York, États-Unis : Oxford University Press.
- Villeneuve, C., Riffon, O. et Tremblay, D. (2016). *Comment réaliser une analyse de développement durable?: guide d'utilisation de la grille d'analyse de développement durable*. Repéré à <https://constellation.uqac.ca/3959/>
- Villeneuve, J., Palacios, J. H., Savoie, P. et Godbout, S. (2012). A critical review of emission standards and regulations regarding biomass combustion in small scale units (< 3 MW). *Bioresource technology*, 111, 1-11. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852412003124>
- Vision Biomasse Québec. (2015a). *Nouvelle politique énergétique québécoise : la filière du chauffage à la biomasse forestière résiduelle doit faire partie de la solution*. Repéré à [https://visionbiomassequebec.org/wp-content/uploads/2019/07/ME15-05-11\\_Lettre-ouverte-Vision-Biomasse-Que%CC%81bec-1.pdf](https://visionbiomassequebec.org/wp-content/uploads/2019/07/ME15-05-11_Lettre-ouverte-Vision-Biomasse-Que%CC%81bec-1.pdf)
- Vision Biomasse Québec. (2015b). *Le chauffage à la biomasse forestière résiduelle*. Repéré à [https://visionbiomassequebec.org/wp-content/uploads/2019/07/ME15-10-20\\_VBQ\\_Cible-GES.pdf](https://visionbiomassequebec.org/wp-content/uploads/2019/07/ME15-10-20_VBQ_Cible-GES.pdf)
- Vision Biomasse Québec. (2015c). *Les projets de chauffage à la biomasse sont-ils tous un succès ?*. Repéré à <https://visionbiomassequebec.org/les-projets-de-chauffage-a-la-biomasse-sont-ils-tous-un-succes/>
- Vision Biomasse Québec. (s. d.). *Vitrine de projets de chauffage à la biomasse forestière par région*. Repéré à <https://visionbiomassequebec.org/vitrine-de-projets-chauffage-a-la-biomasse-forestiere/hopital-damqui/>
- Walker, T., Cardellichio, P., Colnes, A., Gunn, J., Kittler, B., Perschel, B.,...Recchia, C. (2010). *Biomass sustainability and carbon policy study*. Repéré à <https://www.biomassmurder.org/docs/2010-08-30-manomet-biomass-sustainability-and-carbon-policy-study-english.pdf>

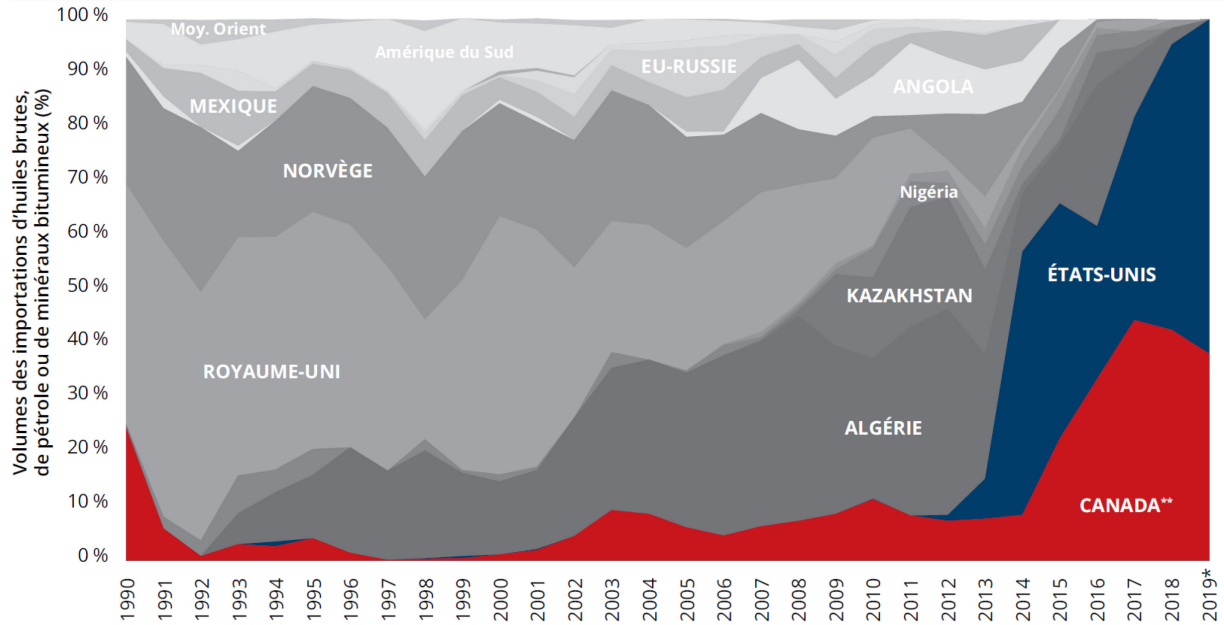
- Walmsley, J. D., Jones, D. L., Reynolds, B., Price, M. H. et Healey, J. R. (2009). Whole tree harvesting can reduce second rotation forest productivity. *Forest Ecology and Management*, 257(3), 1104-1111. Repéré à
- Whiteside, M. D., Digman, M. A., Gratton, E. et Treseder, K. K. (2012). Organic nitrogen uptake by arbuscular mycorrhizal fungi in a boreal forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 55, 7-13. Repéré à [https://www.sciencedirect-com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/pii/S0038071712002374?casa\\_token=oXBHx5jbO6kAAAAA:IVZC5qVL\\_xO-Ia0ES8CFpABSnRJfXfNbdFp\\_wQDMeQV-62eC2jnEVOFffYgpg53iUqS-t0Wj](https://www.sciencedirect.com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/pii/S0038071712002374?casa_token=oXBHx5jbO6kAAAAA:IVZC5qVL_xO-Ia0ES8CFpABSnRJfXfNbdFp_wQDMeQV-62eC2jnEVOFffYgpg53iUqS-t0Wj)
- Whitmore, J. et P.-O. Pineau. (2020). *État de l'énergie au Québec 2020*. Repéré à <https://energie.hec.ca/eeq/>
- Woo, H. et Turner, P. (2019). A Review of Recent Research on Carbon Neutrality in Forest Bioenergy Feedstocks. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, 19(3), 80-83. Repéré à <https://ideas.repec.org/a/adp/ijesnr/v19y2019i3p80-83.html>
- Work, T. T., Klimaszewski, J., Thiffault, E., Bourdon, C., Pare, D., Bousquet, Y.,...Titus, B. (2013). Initial responses of rove and ground beetles (Coleoptera, Staphylinidae, Carabidae) to removal of logging residues following clearcut harvesting in the boreal forest of Quebec, Canada. *ZooKeys*, (258), 31. Repéré à <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3591755/>
- World Bioenergy Association (WBA). (2012). *The carbon neutrality of biomass from forests*. Repéré à <https://worldbioenergy.org/uploads/Factsheet%20-%20Carbon%20neutrality.pdf>
- Wyman, R. L. et Jancola, J. (1992). Degree and scale of terrestrial acidification and amphibian community structure. *Journal of Herpetology*, 392-401. Repéré à <https://www-jstor-org.ezproxy.usherbrooke.ca/stable/pdf/1565115.pdf?refreqid=excelsior%3Ab4c0f6b07ae4bbaad8ff022f8aa660eb>
- Yang, L., Xu, F., Ge, X. et Li, Y. (2015). Challenges and strategies for solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 824-834. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211500012X>
- Yemshanov, D., McKenney, D. W. et Hope, E. S. (2018). Comparing Alternative Biomass Supply Options for Canada: What Story Do Cost Curves Tell?. *BioResources*, 13(2), 3157-3164. Repéré à [https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes\\_13\\_2\\_3157\\_Yernshanov\\_Comparing\\_Alternative\\_Biomass\\_Canada](https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_13_2_3157_Yernshanov_Comparing_Alternative_Biomass_Canada)
- Yemshanov, D., McKenney, D. W., Fraleigh, S., McConkey, B., Huffman, T. et Smith, S. (2014) Cost estimates of post harvest forest biomass supply for Canada. *Biomass and Bioenergy*, 69, 80-94. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953414003353>
- Zhang, L., Brook, J. R., Vet, R., Wiebe, A., Mihele, C., Shaw, M.,...Iqbal, S. (2005). Estimation of contributions of NO<sub>2</sub> and PAN to total atmospheric deposition of oxidized nitrogen across Eastern Canada. *Atmospheric Environment*, 39(37), 7030-7043. Repéré à [https://www-sciencedirect-com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/pii/S1352231005007417?casa\\_token=jWKer0CUrQYAAAAA:4VsiSS93DpoRQ7Wf92PsmT8kjBJly4J85UJsmBYI6iZ0FMh5XQbOTXdu785\\_YWClvCnLFU1v](https://www-sciencedirect-com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/pii/S1352231005007417?casa_token=jWKer0CUrQYAAAAA:4VsiSS93DpoRQ7Wf92PsmT8kjBJly4J85UJsmBYI6iZ0FMh5XQbOTXdu785_YWClvCnLFU1v)



Zhang, Y., McKechnie, J., Cormier, D., Lyng, R., Mabee, W., Ogino, A. et Maclean, H. L. (2010). Life cycle emissions and cost of producing electricity from coal, natural gas, and wood pellets in Ontario, Canada. *Environmental science & technology*, 44(1), 538-544. Repéré à [https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es902555a?casa\\_token=p9qvW-bZ56QAAAAA:pUv31zSGyNu7qscG\\_3DfjwsgUt0efCw9kTXN7acM2tZUxNSjzP-7yhDCJCol6jHoLLikBBvN\\_8K28CE](https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es902555a?casa_token=p9qvW-bZ56QAAAAA:pUv31zSGyNu7qscG_3DfjwsgUt0efCw9kTXN7acM2tZUxNSjzP-7yhDCJCol6jHoLLikBBvN_8K28CE)

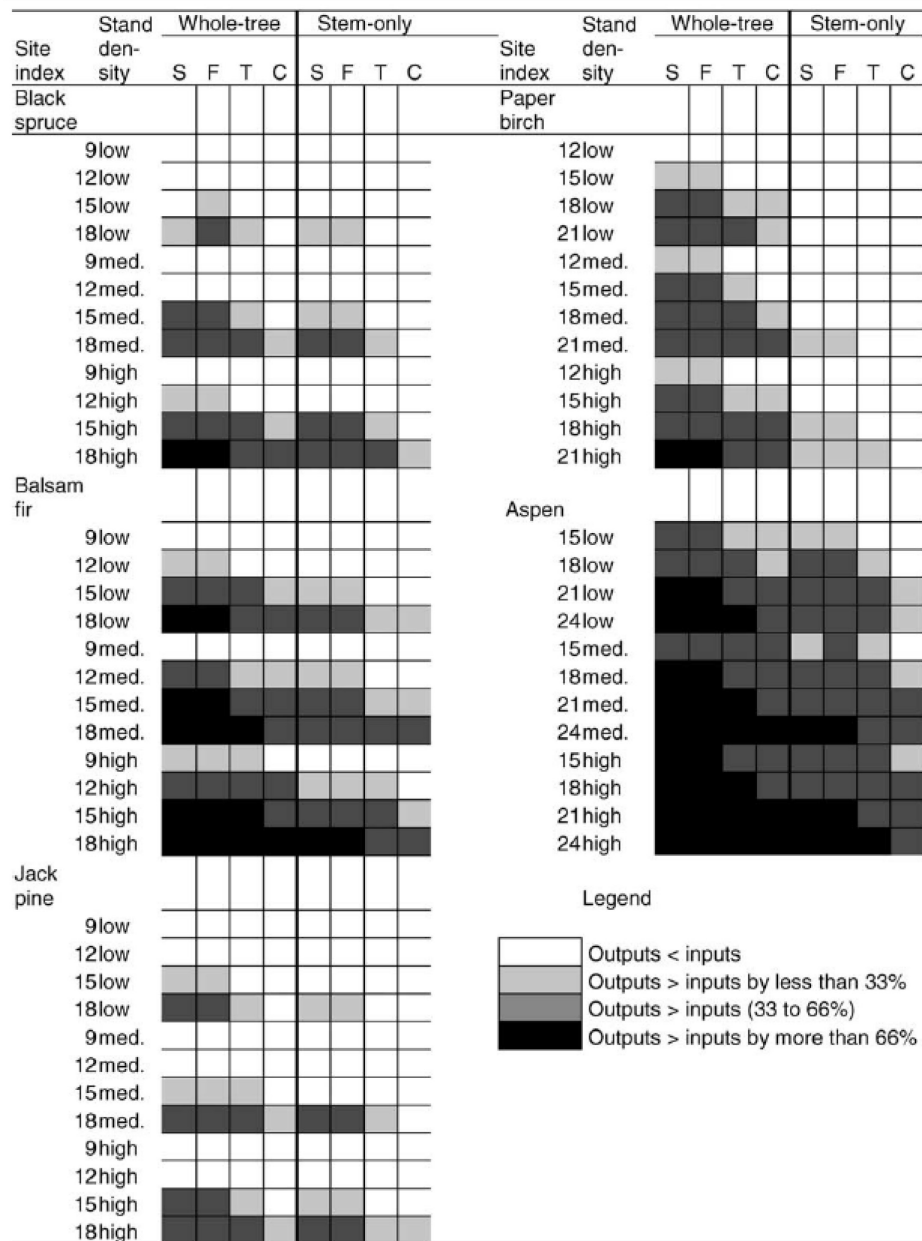
# **ANNEXE 1 : ÉVOLUTION DE LA PROVENANCE DES IMPORTATIONS EN PÉTROLE BRUT AU QUÉBEC, 1990 À 2019**

(tiré de : Whitmore et Pineau, 2020, p. 9)



**ANNEXE 2 : ÉVALUATION DU RISQUE DE DIMINUTION DES NUTRIMENTS DANS UNE FORÊT EXPLOITÉE À  
L'ÂGE DE LA MATURITÉ FINANCIÈRE SELON LA COMPOSITION DU PEUPLEMENT, LA DENSITÉ  
DU PEUPLEMENT, L'INDEX DU SITE, LE TYPE DE RÉCOLTE ET LE TYPE DE SOL**

(tiré de : Paré, Rochon, Brais, 2002, p. 309)



<sup>a</sup> S: thin soil, F: glacio-fluvialite sands, T: till, C: clay.

**ANNEXE 3 : ÉVALUATION DES QUANTITÉS DE CENDRES DÉRIVÉES DU BOIS GÉNÉRÉES ANNUELLEMENT –  
PÉRIODE 2006-2007**

(inspiré de : Hébert et Breton, 2008, p. 19)

Région	Quantité (tm, base humide) générée
Bas Saint-Laurent	11 500
Saguenay-Lac-Saint-Jean	90 000
Québec	10 500
Mauricie	14 500
Estrie	25 000
Montréal	0
Outaouais	85 000
Abitibi-Témiscamingue	50 000
Côte-Nord	23 000
Gaspésie	5 500
Lanaudière	2 500
<b>Total</b>	<b>317 500</b>